

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 11
№ 2 / 2021**

Владикавказ 2021

**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**, Высокотемпературный 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Выпускающий редактор

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 – Весна над Геналдоном (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. Zalikhhanov, 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

Vladimir I. Golik, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

Kuo-Liang Wen, Ph. D., National Central University, Taiwan

Ganapathy Pattukandan Ganapathy, Ph.D, Prof.
Centre for Disaster Mitigation and Management Vellore
Institute of Technology, India

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

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

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

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

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

Marina V. Rylnikova, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Institute
of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian
Federation

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

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 – Spring on the Genaldon (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Газеев В. М., Гурбанова О. А.

Субпромышленные содержания благородных металлов в отходах Фиагдонской обогатительной фабрики: возможный новый для Северного Кавказа золото-платиноидный с полиметаллами тип оруденения, локализованный в ранне-среднеюрских черных сланцах

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

Алиев Ад. А., Етирмишли Г. Д.

Новые данные об извержениях грязевых вулканов в Азербайджане

Велиев Г. О.

Роль геодинамического напряжения в формировании нефтегазовых структур в Каспийском море (на примере месторождений Шахдениз, Умид, Бабек, Булла-Дениз)

Казымов И. Е.

Геодинамика территории Азербайджана на основе данных GPS за 2017-2019 гг.

ГЕОФИЗИКА

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

Геофизический мониторинг разработки напряженно-деформированных рудомещающих массивов

Идармачев Ш. Г., Черкашин В. И., Идармачев И. Ш.

Сейсмометрический мониторинг неустойчивого скального массива в Гунибском районе Дагестана (Северный Кавказ)

Чернов Ю. К.

Опыт детальных вероятностных оценок возможных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Дробинский А. А., Жуковская О. А.

Методика локального улучшения суммирования ОСТ для повышения прослеживаемости отдельных отражающих горизонтов

Эзирбаев Т. Б.

Обзор технологий комплексной обработки переинтерпретации данных геофизических исследований скважин для детального расчленения разреза и переоценки запасов углеводородов

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Босиков И. И., Ключев Р. В., Текиев М. В.

Анализ пространственного распределения химических элементов апатит-штафелитовых руд

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Попов М. Г., Попова О. Г.

Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмоэкологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности.....

CONTENTS

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Gazeev V. M., Gurbanova O. A.

Abnormally high content of noble metals in wastes of the Fiagdon concentration plant: a possible new type of mineralization for the North Caucasus is gold-platinoid with base metals, localized in the Early-Middle Jurassic black shales

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Aliyev Ad. A., Yetirmishli G. D.

New data on eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan

Veliev G. O.

The role of geodynamic stress in the formation of oil and gas structures in the Caspian Sea (on the example of the Shah Deniz, Umid, Babek, Bulla Deniz fields)

Kazimov I. E.

Geodynamics of the territory of Azerbaijan on the basis of GPS data in 2017-2019 yy.

GEOPHYSICS

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

Geophysical monitoring of the development of stress-deformed ore massives

Idarmachev Sh. G., Cherkashin V. I., Idarmachev I. Sh.

Seismometric Monitoring of an Unstable Rock Mass in the Gunib district of Dagestan (North Caucasus)

Chernov Yu. K.

The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania

GEOPHYSICAL METHODS

Drobinskiy A. A., Zhukovskaya O. A.

Local CMP stacking improvement technique for better traceability of separate reflection horizon

Ezirbaev T. B.

Review of technologies for integrated processing of reinterpretation of well logging data for detailed dissection of the section and revaluation of hydrocarbon reserves

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Bosikov I. I., Klyuev R. V., Tekiev M. V.

Analysis of spatial distribution of chemical elements of apatite-stafelite ore

GEOECOLOGY

Popov M. G., Popova O. V.

The possibility of complex studying for the geological environment during seismic-ecological monitoring in areas of increased environmental danger

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5

DOI: 10.46698/VNC. 2021.41.26.001

Оригинальная статья

Аномально высокие содержания благородных металлов в отходах Фиагдонской обогатительной фабрики: возможный новый для Северного Кавказа золото-платиноидный с полиметаллами тип оруденения, локализованный в ранне-среднеюрских черных сланцах

А. Г. Гурбанов ^{1, 2}, А. Я. Докучаев ¹, В. М. Газеев ^{1, 2}, О. А. Гурбанова ³

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

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

³Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФГБОУ высшего образования Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ), Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

Статья поступила: 11.02.2021, доработана: 30.03.2021, принята к публикации: 05.04.2021

Резюме: Актуальность работы. На Северном Кавказе благороднометалльное (золото, серебро, платина, элементы платиновой группы) оруденение черносланцевого типа локализовано в тоар-ааленских флишоидных углеродсодержащих терригенных отложениях, приуроченных к региональной Самуро-Белореченской металлогенической зоне (СБМЗ) – от Дагестана до Адыгеи и Краснодарского края. Вовлечение в поисково-разведочные работы этого стратегического минерального типа оруденения дает возможность расширить минерально-сырьевую базу Южного федерального округа России. **Цель исследований** – выявление содержаний благородных металлов и элементов платиновой группы (ЭПГ) в промышленных отходах Фиагдонской обогатительной фабрики (ФОФ) и в рудовмещающих тоар-ааленских черносланцевых толщах. ФОФ, в частности, перерабатывала руды полиметаллических месторождений Кадат и Какадур, локализованных в тоар-ааленских флишоидных углеродсодержащих терригенных отложениях Авсандур-Ламардонского рудного поля (АЛРП). Проведена оценка АЛРП на возможность выявления здесь промышленно значимого золото-платиноидного с полиметаллами оруденения в черносланцевой толще. **Методы исследования.** ICP-MS анализом проанализированы 5 проб в Центре «ИГЕМ-Аналитика» на масс-спектрометре X-Series II и 13 проб – в Лаборатории физико-химических и химических методов анализа ИМГРЭ на приборе Elan 6100 DRC. **Результаты работы.** Установленные в 18 пробах (в керне скважин) Фиагдонского хвостохранилища (ФХ) повышенные содержания благородных металлов можно объяснить наличием как в рудах АЛРП, так и во вмещающей их ниже-среднеюрской углеродсодержащей песчано-глинистой флишоидной толще нового для Северного Кавказа ниже-среднеюрского золото-платиноидного с полиметаллами оруденения в черносланцевой толще (2,5-3,2 мас. % УГВ). Предложена модель

образования золото-платинового оруденения черносланцевого типа за счет конвекции вадозных вод в высоко металлоносных (*Au, Ag, Pt, Pd*) ранне-среднеюрских флишеидных толщах алевритно-аргиллитового состава. При поисковых работах на золото-кварцевый, золото-сульфидный и колчеданно-полиметаллический с золотом типы оруденения в Горной Осетии и в восточной части Горного Дагестана был выявлен ряд перспективных на золото объектов. В пределах СБМЗ может быть выявлен ряд промышленно значимых объектов с золото-платиноидным с полиметаллами оруденением в черносланцевых толщах тоар-ааленского возраста. Предложен комплекс мероприятий с минимальными временными, материальными и финансовыми затратами.

Ключевые слова: золото-платиноидное с полиметаллами оруденение, черносланцевые толщи, источники благороднометалльного оруденения, рудовмещающие углеродсодержащие аргиллиты, Самуро-Белореченская металлогеническая зона, Северный Кавказ.

Для цитирования: Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Газеев В. М., Гурбанова О. А. Аномально высокие содержания благородных металлов в отходах Фиагдонской обогатительной фабрики: возможный новый для Северного Кавказа золото-платиноидный с полиметаллами тип оруденения, локализованный в ранне-среднеюрских черных сланцах. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.41.26.001.

Благодарности: Работа выполнена по плану НИР ВНЦ РАН при финансовой поддержке НИОКТР КНИО ВНЦ РАН (регистрационный № АААА-А19-119040190054-8) и в рамках Базовой темы Лаборатории петрографии ИГЕМ РАН «Петрология и минералогия магматизма конвергентных и внутриплитных обстановок: история формирования крупных континентальных блоков». Регистрационный № ЕГИСУ НИОКТР 121041500222-4.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

DOI: 10.46698/VNC. 2021.41.26.001

Original paper

Abnormally high content of noble metals in wastes of the Fiagdon concentration plant: a possible new type of mineralization for the North Caucasus is gold-platinoid with base metals, localized in the Early-Middle Jurassic black shales

A. G. Gurbanov ^{1,2}, A. Ya. Dokuchaev ¹, V. M. Gazeev ^{1,2}, O. A. Gurbanova ³

¹Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry RAS, 35 Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: gurbanov@igem. ru;

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

³Lomonosov Moscow State University, 1 Lenin Hills, Moscow 119991, Russian Federation

Received: 11.02.2021, revised: 30.03.2021, accepted: 05.04.2021

Abstract: Relevance. In the North Caucasus noble-metal (gold, silver, platinum, elements of the platinum group (PGE)) mineralization of the black-shale type is localized in Toar-Aalenian flysch-like organic matter rich, terrigenous sediments in the regional (from Dagestan to Adygea and Krasnodar Territory) Samuro-Belorechenskaya

metallogenic zone (SBMZ). Involvement in prospecting and exploration of this strategic type of mineralization provides the opportunity to expand the mineral resource base of the Southern Federal District of Russia. **The Aim of the research** is to identify the content of platinum and PGE in the industrial wastes of the Fiagdon concentration plant (FCP) and in the ore-bearing Toar-Aalenian black shale strata. In particular, processed ores of the Kadat and Kakadur polymetallic deposits, localized in Avsandur-Lamardon ore field (ALOF). The ALRP was prospected for economic gold-platinum with polymetallic deposit in the black-shales series. **Methods.** ICP-MS analysis – 5 samples were analyzed by ICP-MS in IGEM-Analytics Center on an X-Series II mass spectrometer and 13 samples – in the Laboratory of Physical-Chemical and Chemical Methods of Analysis of the IMGRE on the Elan 6100 DRC instrument. **Results.** The elevated noble metal concentrations established in 18 samples (borehole core samples) from the Fiagdon tailings dump could be explained by the presence of both the ALRP ores and the gold-platinum with polymetallic mineralization in the host Toar- Aalenian black-shales series (2.5-3.2 wt. % of carbonaceous matter). The model of formation of gold-platinum mineralization at the expense of vadose water convection in highly metalliferous (Au, Ag, Pt, Pd) Early-Middle Jurassic flysch-like strata of siltstone-argillite composition is proposed. During prospecting works for gold-quartz, gold-sulfide and colliery-polymetallic with gold types of mineralization in the Mountain Ossetia and in the eastern part of Mountain Dagestan a number of promising objects for gold were revealed. A number of economic significant objects with gold-platinum with polymetallic mineralization in black-shale series of Toar-Aalenian age can be identified within the SBMZ. A complex of prospecting with minimal time, material and financial expenses is proposed.

Keywords: gold-platinum with polymetallic mineralization, black-shaleseries, sources of noble-metal mineralization, ore-bearing organic matter-bearing argillites, Samuro-Belorechenskaya metallogenic zone, Northern Caucasus.

For citation: Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Gazeev V. M., Gurbanova O. A. Abnormally high content of noble metals in wastes of the Fiagdon concentration plant: a possible new type of mineralization for the North Caucasus is gold-platinoid with base metals, localized in the Early-Middle Jurassic black shales. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): xx-xx. DOI: 10.46698/VNC. 2021.41.26.001.

Acknowledgments: This work was supported by State Topic registration number AAAA-A19-119040190054-8 in CRD VSC RAS and within the framework of the Basic Theme of the Laboratory of Petrography at IGEM RAS "Petrology and minerageny of magmatism in convergent and intraplate environments: history of formation of large continental blocks" Registration No. EGISU R&D 121041500222-4.

Введение

Комплексная утилизация техногенных месторождений в России позволяет решать проблему сырьевых источников большинства высокотехнологичных металлов. Захороненные промышленные отходы ГОКов имеют значительный практический интерес: они часто являются комплексными и характеризуются значительными запасами и повышенными концентрациями экономически важных рудных элементов (включая благородные металлы и металлы платиновой группы – МПГ). Важным экономическим стимулом при этом является отсутствие дополнительных транспортных расходов и энергетических затрат на их измельчение.

Фундаментальной проблемой геологии золоторудных месторождений является установление причин их платино- и палладиеносности. Основная часть ресурсов Pt связана с магматическими ее источниками, гипербазитами. Но все большее значение начинают иметь гидротермальные источники, вплоть до телетермальных месторождений цветных и редких металлов.

Главным мировым источником добычи минералов МПГ являются собственно магматические месторождения. Более 99% мировых запасов (ведущими являются Китай, Канада, США, Финляндия, ЮАР, Австралия) сосредоточено в малосульфидных платинометалльных, сульфидных платиноидно-медно-никелевых и платиноидно-хромитовых месторождениях; на другие источники приходится менее 0,3%.

Новым мировым источником прироста ресурсов, запасов и добычи МПГ в текущем столетии являются разновозрастные металлоносные высоко-углеродсодержащие комплексы, характерные для всех континентов. Месторождения МПГ этого типа в Южном Китае (Цзиньбаошань в провинции Юньнань) локализованы в глинистых сланцах нижнего кембрия [Котельников и др., 2019; Coveney, Chen, 1989; Fan Delian et al., 1984]. Платиноиды, и в первую очередь палладий, в России извлекаются совместно с платиной из сульфидных медно-никелевых руд Норильского узла. Нетрадиционные источники получения этих металлов установлены в сульфидах из «черных курильщиков» на дне океанов [Hodge et al., 1985], в техногенных россыпях и хвостохранилищах [Sparrow, Woodcock, 1991], в регенерированных месторождениях, проявленных в пределах различных геологических провинций. На Дальнем Востоке имеется ряд геологических объектов, уникальность которых выявлена спустя многие годы после их открытия. В сороковые годы прошлого столетия месторождения Тамгино-Тургеневской группы (север Ханкайского террейна) стали крупнейшим в СССР источником кристаллического графита. Недавно установлено, что они содержат значительные запасы *Au* и МПГ [Ханчук и др., 2004].

Геохимическая специализация на элементы платиновой группы (ЭПГ), установленная для золоторудных месторождений в черносланцевых толщах различными методами [Буряк и др., 2001, 2005; Гончаров и др., 1995], требует выявления минеральных форм нахождения ЭПГ, а также типоморфных минералов – спутников ЭПГ (прежде всего, ими являются минералы *Ni*).

Целью наших исследований было выявление содержаний *Pt* и ЭПГ в промышленных отходах Фиагдонской обогатительной фабрики (ФОФ), которая перерабатывала руды полиметаллических месторождений Кадат и Какадур, а также во вмещающих их тоар-ааленских флишоидных углеродсодержащих (2,5-3,2 мас. % УГВ) терригенных отложениях Авсандур-Ламардонского рудного поля (АЛРП) и оценка АЛРП на возможность выявления в нем промышленно значимого золото-платиноидного с полиметаллами оруденения в черносланцевых толщах.

Методы исследований

Методы отбора проб и их подготовки для анализа детально рассмотрены в [Гурбанов и др., 2020a]. Пять проб хвостов и 9 проб из вертикального 700-метрового ранне-среднеюрского черносланцевого разреза анализировались *ICP MS* методом в ЦКП «ИГЕМ-Аналитика» на масс-спектрометре *X-Series II*, и 13 проб – методом *ICP MS* в Лаборатории физико-химических и химических методов анализа ИМГРЭ на приборе *Elan 6100 DRC* с использованием международных стандартов.

Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотренные ранее (Давыдов и др., 2009; Туаев, 2019 в [Гурбанов и др., 2020a], а также [Лазаренков и др., 1998; Мацапулин и др., 2009]) объекты с золото-сульфидно-кварцевым оруденением в пределах тоар-ааленских флишоидных углеродсодержащих терригенных отложений Авсандур-Ламардонского рудного поля АЛРП (Северная Осетия) помогли выявить следующие их особенности: 1) Потенциально перспективные рудные тела приурочены к участкам, для которых характерна наибольшая степень гидротермально-метасоматических изменений и тектонической нарушенности черносланцевых толщ (аргиллиты и алевролиты), что отразилось в объемном окварцевании и в образовании маломощных (до 20-40 см)

кварцевых жил, в значительной лимонитизации, в развитии прожилковой, мелко гнездовой и рассеянной вкрапленности сульфидов (пирит, галенит, сфалерит, халькопирит). Тектоническая проработка отразилась в развитии зон дробления, с зеркалами скольжения и глинками трения. 2) Выявлен новый минеральный тип руд, который может иметь промышленное значение – золото-мышьяковисто-полиметаллический с тонкодисперсным *Au*, с типичными для АЛРП содержаниями *Au* 2,0 г/т и высокими концентрациями рудных элементов. 3) Минералами-концентраторами *Au* являются мышьяковистый пирит и арсенопирит, а *Ag* – галенит. 4) По результатам технологических испытаний руды отнесены к труднообогатимым полиметаллическим слабо окисленным золото-сульфидно-кварцевым. Суммарное извлечение *Au* – 65,09%, *Ag* – 41,59% (ионообменная смола и цинковый концентрат). 5) Запасы *Au* категории P_1 составили 23,1 т (при содержании *Au* 1,84 г/т) и категории P_2 –25,9 т (при содержании *Au* 1,74 г/т) (Туаев, 2019 в [Гурбанов и др., 2020а]). 6) Показана возможность рентабельной отработки открытым способом 43% рудной массы при борте 0,5 г/т и 57% – подземным штольневым способом (Туаев, 2019 в [Гурбанов и др., 2020а]). 7) Содержания *Pt* и ЭПГ при поисковых работах не определялись.

Помимо данных, полученных по АЛРП, необходимо учесть следующие факты: 1) Резко повышенные суммарные содержания *Pt* и ЭПГ, варьирующие от 0,122 г/т до 1,35 г/т, выявлены в захороненных в Фиагдонском хвостохранилище (ФХ) промышленных отходах обогатительной фабрики [Гурбанов и др., 2020а]. 2) Повышенные содержания *Au*, *Pt* и ЭПГ установлены в ниже-среднеюрских углеродсодержащих аргиллитах, вмещающих золото-сульфидные и золото-кварцевые рудные тела в пределах АЛРП, а также в расположенных на 400–600 м ниже уровня дневной поверхности рудных телах полиметаллических месторождений Кадат и Какадур, по данным анализов материала из хвостохранилища [Гурбанов и др., 2020а]. Следовательно, в области распространения тоар-ааленских углеродисто-терригенных толщ целесообразно выделить Фиагдон-Терскую металлогеническую подзону, перспективную на обнаружение золото-платиноидного с полиметаллами оруденения в черносланцевых толщах, являющуюся частью региональной Самуро-Белореченской металлогенической зоны (СБМЗ).

Пока не решены вопросы об источнике рудного вещества (*Au*, *Pt*, *Pd*) и генезисе данного типа оруденения. Для их понимания ниже дано описание полиметаллических месторождений Кадат и Какадур, региональных субмеридиональных ослабленных зон, а также приведены новые данные о содержании *Au*, *Pt* и ЭПГ в пробах из ФХ и из тоар-ааленских черносланцевых толщ, вмещающих эти месторождения.

Геолого-структурная характеристика ранне-среднеюрского колчеданно-полиметаллического и свинцово-цинкового оруденения Самуро-Белореченской металлогенической зоны

При обсуждении возможного наличия золото-платинового оруденения в тоар-ааленских толщах, развитых в пределах АЛРП, включающего Какадур-Ханикомское (Как-Х) и Кадат-Хампаладагское (Кад-Х) месторождения, необходимо рассмотреть геологическое строение и металлогенические особенности ранне-среднеюрской тектонической подзоны Промежуточных синклиналей [Черницын и др., 1971] Северного склона Главного Кавказского хребта (рис. 1 в [Гурбанов и др., 2020б]).

На ранне-среднеюрском этапе развития Большого Кавказа (БК), в первую оче-

редь, образовались колчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения, связанные с вулканитами основного состава (Филизчай, Кизил-Дере), часть рудных тел которых сингенетична вмещающим аргиллитовым углеродсодержащим толщам; в позднеааленское время сформировались свинцово-цинковые жильные месторождения Как-Х, Кад-Х, Садон, Джимидон, Гули, Тюалойское, Лаура и другие, не проникающие в байосские и более молодые отложения [Черницын, 1977]. В этот период БК (особенно Приводораздельная металлогеническая подзона, в которой локализованы Как-Х и Кад-Х месторождения) испытывал интенсивное прогибание, в результате чего накопились мощные (более 2 км) аспидные толщи. Наиболее интенсивно свинцово-цинковое оруденение на БК формировалось в среднеюрское время (период предкелловейской складчатости), когда образовались жильные месторождения садонского типа (Садон, Как-Х, Кад-Х, Згид, Фаснал, Джимидон и др.), приуроченные к Северо-Кавказскому полиметаллическому поясу. Ко времени их формирования на БК завершился этап прогибания и начался период умеренной предкелловейской складчатости. Предкелловейское полиметаллическое оруденение сформировалось в северной части активной континентальной окраины, в раннеюрское время не претерпевшей интенсивного погружения (здесь сохранился гранитно-метаморфический слой, а также происходили частые разнознаковые движения, приведшие к дроблению слагающих ее пород).

Генетические типы и рудные формации. Среди свинцово-цинковых месторождений БК выделено четыре генетических типа: 1) скарновый; 2) гидротермально-осадочный; 3) гидротермальный (к нему относятся месторождения Как-Х и Кад-Х) и 4) осадочно-диагенетический.

Месторождения Как-Х и Кад-Х относятся к гидротермальному типу. Гидротермальная деятельность, сформировавшая эти жильные месторождения, проявлялась на БК как на заключительном этапе развития активной континентальной окраины, так и в постскладчатый период. Кварц-полиметаллическая рудная формация на БК представлена многочисленными объектами, обладающими рядом общих характерных черт: 1) главные минералы – галенит, сфалерит, пирит, халькопирит, кварц и карбонаты; 2) формирование на малых (0,7-4,0 км) глубинах; 3) три основные стадии рудообразования: кварц-пиритовая, кварц-карбонат-сульфидная и безрудная кварц-карбонатная [Черницын, 1977; Черницын и др., 1971].

Ранне-среднеюрские свинцово-цинковые месторождения Северо-Кавказского полиметаллического пояса представлены двумя группами, имеющими разную морфологию рудных тел и интенсивность проявления оруденения (последние обусловлены физико-механическими свойствами вмещающих пород): 1) богатое оруденение, локализованное в позднепалеозойских гранитах с характерными хрупкими деформациями (Садон, Згид и др.), выдержанное по падению и простиранию; 2) неправильной формы и бедные по содержанию свинца и цинка рудные тела месторождений, локализованных в пластичных углеродистых аргиллитах и песчаниках (Как-Х, Кад-Х, Куруш и др.). Околорудные изменения вмещающих пород представлены слабо проявленными хлоритизацией, окварцеванием, реже гематитизацией и карбонатизацией. Максимальная мощность околорудных метасоматитов до 5 м. Эти процессы сопровождались выносом натрия и привносом *Mg*, *Ca*, *Fe*.

Вещественный состав руд и стадийность рудоотложения. Для формаций со свинцово-цинковым оруденением характерен постоянный минеральный состав, а отличия заключаются в элементах-примесях (в зависимости от источника), в усло-

виях рудоотложения (температура, pH и Eh) и геохимических особенностях вмещающих пород. Основные элементы-примеси в рудах – Cd , Ag , Bi , Ga , In , Co (Sb , Mo встречаются редко). Главные рудные минералы – галенит, сфалерит, пирит, второстепенные – халькопирит, пирротин, марказит, арсенопирит. Главные жильные минералы – кварц, кальцит, второстепенные – барит, хлорит и серицит. При формировании кварц-полиметаллических месторождений выделяются [Черницын, 1977] стадии: I-я (не имеет промышленного значения) – пирит-кварцевая. Основные минералы – кварц (серый), пирит и серицит; второстепенные – арсенопирит, хлорит. Редкие минералы – альбит, касситерит, молибденит. Основные элементы – Fe , S ; второстепенный – As ; редкие – Sn и Mo . II-я – кварц-карбонат-сульфидная. Основные минералы – кварц (молочно-белый), сфалерит, галенит, пирит и халькопирит; второстепенные – карбонаты, серицит, пирротин, марказит, мельниковит, магнетит, висмутин, серебро; редкие – блёклые руды, самородные висмут и мышьяк. Основные элементы – Ca , Fe , S , Zn , Pb , Cu , Cd , Bi , In , Ag ; второстепенные – As , Sn , Sb . Минералы этой стадии составляют 80-90% рудных тел. III – я (имеет малое промышленное значение) – сульфидно-карбонатная. Основные минералы – карбонаты; второстепенные – галенит, халькопирит, пирит, клейофан, кварц (друзовый), хлорит; редкие минералы – барит, диксит, реальгар, аурипигмент. Основные элементы – Ca , Fe ; второстепенные – S , Pb , Zn ; редкие – Cu , Ba .

На всех промышленных полиметаллических месторождениях БК основные стадии минералообразования всегда проявлены полностью. Важно подчеркнуть, что предыдущими исследованиями в рудных телах и во вмещающих породах не были обнаружены минералы или элементы Au , Pt и платиновой группы

Структурный контроль. Как-Х и Кад-Х месторождения расположены в Какадур-Ламардонской рудной зоне АЛРП на восточном окончании Садоно-Унальской антиклинали (Давыдов и др., 2009 в [Гурбанов и др., 2020a]); они входят в Северо-Кавказский полиметаллический пояс (составную часть СБМЗ) с жестким сиалическим фундаментом. Пояс приурочен к периферической части ниже-среднеюрского прогиба. Прогиб с севера ограничен эскарпом Скалистого хребта, сложенного верхнеюрско-меловыми известняками и мергелями, а с юга – Адайхох-Дарьяльской структурно-формационной зоной, сложенной толщей нижеюрских слабо метаморфизованных терригенных отложений, прорванных дайками и мелкими массивами габбро, диабазов среднеюрского Казбекского дайкового пояса и позднеплейстоценовыми гранитоидами Теплинского комплекса. В пределах подзоны Промежуточных синклиналей прослеживается цепь горст-антиклинальных поднятий, образующих подзоны Северных антиклиналей – Садоно-Унальскую, Фиагдонскую, Балкаро-Дигорскую. Эти поднятия сложены породами палеозойского фундамента – гранитами, кристаллическими сланцами и амфиболитами; в крыльях поднятий развиты породы верхнего палеозоя (пермо-карбоновые кварцевые конгломераты, мраморизованные известняки) и нижней юры (вулканогенно-осадочные породы осетинской и мизурской свит). Рудные тела месторождений приурочены к зонам перемятых аргиллитов и контролируются разломами северо-западного простирания, косо пересекающими антиклиналь.

В локализации киммерийского оруденения определенную роль играли региональные долгоживущие субмеридиональные ослабленные зоны глубинного заложения [Гурбанов и др., 2020a]. В региональном плане Как-Х и Кад-Х месторождения приурочены к узлам пересечения тектонической подзоны Промежуточных

синклиналей (или Приводораздельной металлогенической зоны) с двумя субмеридиональными ослабленными зонами (Восточно-Фиагдонской – ВФОЗ и Западно-Фиагдонской – ЗФОЗ). В пределах ВФОЗ и ЗФОЗ имеются локальные зоны шириной до 100-200 м, в которых ранне-среднеюрские аргиллиты и алевролиты (с редкими 2-3 мм линзовидными прослоями УГВ) интенсивно раздроблены, местами милонитизированы и гидротермально изменены (развитие маломощных, до 1-3 мм, кварцевых, кварц-карбонатных и кварц-полевошпатовых прожилков с редкой вкрапленностью пирита, сфалерита, галенита). ВФОЗ прослежена от СФЗ Южного склона на север на 40 км (ее ширина – до 1 км); к ней приурочена Ханикомская антиклиналь, осложненная серией субширотных разломов, сопровождающихся мощными зонами смятия. В пределах ВФОЗ локализованы Как-Х месторождение и ряд рудопроявлений (Гули, Цмити, Авсандур и др.). ЗФОЗ прослежена от СФЗ Южного склона на север на 40 км при ширине 1,0-1,5 км. В месте ее пересечения с субширотным Садоно-Унальским взбросом расположены Кад-Х полиметаллическое месторождение и ряд рудопроявлений. Важным элементом контроля киммерийского оруденения являются структурные этажи. Полиметаллические жилы не проникают в верхнеюрский-нижнемеловой этаж. Оруденение локализовано в нижне-среднеюрском и домезозойских этажах. Наиболее благоприятной для свинцово-цинкового киммерийского оруденения является зона контакта палеозойского (жесткого) и нижне-среднеюрского (пластичного) этажей. Этим объясняется концентрация свинцово-цинковых месторождений в юго-восточном (Горная Осетия) погружении кристаллического ядра БК. Для Осетии эмпирически определены протяженность рудоносного интервала для киммерийского свинцово-цинкового оруденения (до 2500-3000 м) и глубины формирования самых верхних частей рудных жил (на 700-1000 м ниже земной поверхности) [Черницын, 1977].

Положение рудных полей в пределах пояса определяется разломами и антиклинальными поднятиями северо-западного простирания, типа Садоно-Унальской антиклинали. Важную роль в размещении полиметаллических рудных зон и рудных полей на БК играют разломы субширотного и северо-западного простираний, ограничивающие юрские депрессии: Штуллу-Харесскую в Горной Осетии и Северную в Кабардино-Балкарии, представленные грабенами, заполненными юрскими породами, сформированными в предкелловейское время. К разломам, ограничивающим депрессию, тяготеют группы полиметаллических месторождений. Небольшая часть месторождений (Как-Х и Кад-Х) и рудопроявлений залегает в юрских породах в самой депрессии.

Роль депрессий в структурном контроле мезозойского полиметаллического оруденения хорошо проявлена [Черницын, 1977]. При внедрении интрузий габбро или диоритов ранне-среднеюрского возраста [Nikishin et al., 2001] в осадочные водосодержащие толщи и при высоком региональном геотермическом градиенте, происходит конвекция разогретых (за счет внедрившегося расплава) вадозных вод в надинтрузивную зону из вмещающих пород. При длительной циркуляции разогретых вод, из пород выносятся элементы (включая рудные *Pt*, *Pd*, *Au*, *Ag*, *Pb*, *Zn*, *Cd*, *Bi* и др.), которые переотлагаются во фронтальной части конвективной ячейки. Если во вмещающих углеродсодержащих толщах имеется даже убогая сингенетичная и гидротермальная жильная минерализация, то во фронтальной части конвективной ячейки или интрузива может образоваться промышленно значимое эпитептермальное оруденение. Мы предполагаем, что главным механизмом формирования благород-

нометалльного оруденения могла быть конвекция, а причиной ее функционирования (при отсутствии на поверхности проявлений магматизма) – зоны активных разломов, перемещения по которым привели (за счет трения) к разогреву черносланцевых толщ, насыщенных вадозными водами (эта тектоническая активность проявилась в связи с предкелловейской фазой складчатости).

По нашему предположению, одним из основных условий для формирования этого оруденения является повышенная металлоносность вмещающих аргиллитов. По нашим данным (метод *ICP MS*), в двух сводных пробах, отобранных с площади 10 м² каждая из рудовмещающих аргиллитов из отвалов штолен месторождений Кад-Х и Как-Х, установлены, соответственно, следующие содержания элементов благородных металлов и ЭПГ (в г/т): *Ag*=0,77 и 1,87; *Au*=0,01 и 0,05; *Ru*=0 и 0,002; *Pd*=0,007 и 0,003; *Pt*=0 и 0,002. Толща рудовмещающих аргиллитов характеризуется наличием сингенетических и диагенетических вкрапленных и послойных скоплений сульфидов *Fe*, *Pb* и *Zn*. Полученные данные по другим элементам свидетельствуют о высокой металлоносности пород изученной черносланцевой толщи [Гурбанов и др., 2020б].

Для более представительной оценки степени рудоносности отложений тоар-ааленских углеродсодержащих толщ, в которых локализованы месторождения Как-Х, Кад-Х, а также жильные и штокверковые тела с золотосодержащим свинцово-цинковым и золото-сульфидно-кварцевым типами оруденения в пределах Афсандур-Ламардонского и Дагом-Кадатского рудных полей (Давыдов и др., 2009; Туаев, 2019 в [Гурбанов и др., 2020а]), был опробован (через каждые 80 м методом сколков с площади 10 м² каждая проба) вертикальный 700 – метровый разрез черносланцевой толщи. Три пробы были взяты из нижней части разреза (уровень ФХ; начало автодороги между долинами рек Фиагдон и Мидаграбин-дон); три пробы – из средней части разреза (исток р. Хаником-дон; район перевала); три пробы – из верхней части разреза (отвалы разведочных штолен). Все пробы проанализированы в ЦКП «ИГЕМ-АНАЛИТИКА» методом *ICP MS*. Поведение средних величин содержания оксидов (в масс. %) и ряда элементов (в г/т) видно из приведенных данных: $S_{общ}$ =0,046-0,032-0,53 (здесь и далее в нижней – средней – верхней частях вертикального разреза); Fe_2O_3 =7,3-5,9-7,5; *Cr*=89-84-93; *Ni*=48-40-14,5; *Cu*=37,6-34-84; *Zn*=132-108-98; *As*=53-23-304; *Rb*=132-121-213; *Zr*=179-191-98; *Pb*=45-60-1274; *Sb*=1,7-1,2-5,9; *Ag*=0,07-0,08-1,06; *Au*<ПО – <ПО – 0,06; *Pd*<ПО – <ПО – 0,05; *Ru*<ПО – <ПО – 0,002; *Pt*<ПО – <ПО – 0,003 [Гурбанов и др., 2020а]. Из приведенных данных видно, что степень металлоносности тоар-ааленской черносланцевой толщи на $S_{общ}$, Fe_2O_3 , *Cr*, *Ni*, *Cu*, *Zn*, *As*, *Rb*, *Zr*, *Pb*, *Sb*, *Ag*, а в верхней части разреза – на *Au*, *Pd*, *Ru*, *Pt*, **довольно высокая**. Установлено, что **к верхам** 700 – метрового вертикального разреза (до уровня разведочных штолен полиметаллических месторождений) в черносланцевой толще произошло **увеличение** (в разы) содержаний, по сравнению с низами разреза: $S_{общ}$ – в 11,5; *Cu* – в 2,2; *As* – в 5,7; *Rb* – в 1,6; *Pb* – в 28,3; *Sb* – в 3,5; *Ag* – в 15,1 раза.

Приведенные данные косвенно подтверждают возможность существования, в данном случае, механизма конвекции при формировании полиметаллического и благороднометалльного оруденения в пределах Афсандур-Ламардонского и Дагом-Кадатского рудных полей.

Литологический контроль. В пластичных породах образуются непротяженные рудолокализирующие трещины. Представлены они сетью мелких жил, образу-

щих бедные рудные тела (Как-Х и Кад-Х и др.). Структурной особенностью изученных разрезов участков Какадур и Ламардон является смена зон дробления и серий сближенных плоскостей скольжения, зон расланцевания с глинистыми тектоническими швами и др.; это подтверждает предложенный выше конвекционный механизм формирования оруденения. Анализ имеющихся данных предшествующих исследований по минералого-геохимическому составу рудных тел Как-Х и Кад-Х месторождений показал полное отсутствие информации о нахождении в них самородных золота и платины или содержащих их минералов. Однако, при проведении нами геохимических исследований промышленных отходов ФОФ, перерабатывавшей руды Как-Х и Кад-Х месторождений, были получены следующие данные о содержаниях в них благородных металлов в новых 13 пробах (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Содержание благородных металлов (в г/т) в керне трех скважин /
Contents of noble metal (in ppm) in the core of three wells

Место отбора пробы / Sampling location	Глубина, м / Depth, m	Номера проб / Sample numbers	<i>Ru</i>	<i>Pd</i>	<i>Pt</i>	<i>Au</i>	<i>Ag</i>
1 скв. / 1 well	2	2/16	0,002	0,019	0,003	0,015	5,72
	4	4/16	0,001	0,021	0,000	0,028	2,83
	6	6/16	0,003	0,021	0,001	0,016	3,42
	8	8/16	0,005	0,020	0,001	0,036	3,89
	12	12/16	0,002	0,022	0,002	0,030	3,16
	17	17/16	0,002	0,032	0,000	0,033	2,55
	19	19/16	0,001	0,049	0,66	0,08	-
	20	20/16	0,001	0,045	0,94	0,17	-
	2	24/16	0,002	0,028	0,001	0,037	2,47
2 скв. / 2 well	4	26/16	0,005	0,035	0,005	0,015	2,12
	9	31/16	0,001	0,046	1,29	0,05	-
3 скв. / 3 well	3	35/16	<0,001	0,025	0,000	0,032	2,31
	6	38/16	0,002	0,013	0,002	0,026	2,56
	12	44/16	<0,001	0,026	0,002	0,031	4,81
	22	55/16	0,002	0,017	0,010	0,040	2,52
	28	64/16	0,001	0,042	0,07	0,25	-
	29	66/16	0,005	0,016	0,002	0,048	2,61
	30	68/16	0,001	0,044	0,07	0,11	-
ПО*, г/т			0,001	0,01	0,01	0,001	0,01

Примечание: **31/16** – пробы, проанализированные в ЦКП «ИГЕМ-Аналитика» методом ICP MS (2018 г.); 55/16 – пробы, проанализированные в ИМГРЭ методом ICP MS на Elan 6100 DRC (2020 г.). ПО – предел обнаружения. Скважины расположены в ФХ следующим образом: восточный край – скважина №2 глубиной 10м; центр – скважина №1 глубиной 22м; западный край – скважина №3 глубиной 31,5 м. / Comment: **31/16** – samples analyzed at the CFC “IGEM-Analitica” by the ICP MS method (2018); 55/16 – samples analyzed at IMGRE by the ICP MS method on Elan 6100 DRC (2020). DL – detection limit. Wells are located in the Fiagdon tailing dump as follows: eastern edge – well No. 2, 10 m deep; center – well No. 1, 22 m deep; western edge – well No. 3, 31.5 m deep.

Анализ полученных аналитических данных. В связи с тем, что пока определено содержание благородных металлов (БМ) только в 30% запланированных проб, сейчас невозможно выявить четкие закономерности в характере распределения БМ в вертикальных разрезах ФХ. Тем не менее, полученные данные о повышенных содержаниях БМ как в материале из хвостохранилища, а значит опосредованно как в рудных телах месторождений Как-Х и Кад-Х, так и во вмещающих их углеродсодержащих черносланцевых толщах, позволило предполагать обнаружение здесь нового для Большого Кавказа ранне-среднеюрского золото-платиноидного с полиметаллами оруденения в черносланцевых толщах [Гурбанов и др., 2020a]. Важно отметить, что промышленно значимые содержания *Au* были установлены в рудных телах, локализованных в этих ниже-среднеюрских углеродсодержащих песчано-глинистых толщах, при поисковых работах на золото-сульфидный и золото-серебряный типы оруденения в Горной Осетии (Давыдов и др., 2009 и Туаев, 2019 в [Гурбанов и др., 2020a]). В результате было выделено перспективное на обнаружение *Au* АЛРП с Какадур-Ламардонской рудной зоной (на 400-600 м гипсометрически выше горизонтов штолен месторождений Как-Х и Кад-Х).

Ниже приведена информация о типах БМ оруденения (включая черносланцевый), ранее выявленных на Северном Кавказе.

После положительной оценки перспектив платиноносности девонской толщи углеродсодержащих сланцев [Лазаренков и др., 1998], гипербазитов Северного Кавказа [Парада, 2009, 2017] и среднемиоценовых (чокрак-караганских) слабо литифицированных кварцевых песчаников [Черкашин и др., 2012], круг известных в этом регионе БМ расширился. В черных сланцах р. Большая Лаба обнаружены руте-ниридосмин и самородная платина [Богущ, 2017]. Доказана потенциальная благороднометалльная рудоносность углеродсодержащих сланцев девонского возраста (рудная зона Грушовая с суммарным содержанием БМ до 1 г/т) [Богущ, 2001, 2019; Богущ и др., 2010, 2015, 2016; Буряк и др., 2002]. Ультрабазиты Беденского массива рассматриваются как источник БМ для вмещающих их углеродсодержащих девонских черных сланцев [Богущ и др., 2017; Парада, 2017].

В Горном Дагестане при проведении поисковых и геолого-съёмочных работ *Au* и *Ag* фиксировались в колчеданных залежах, а также в кварцевых и кварц-сульфидных жилах (в том числе и на медно-пирротиновом месторождении Кизил-Дере). ИГ ДНЦ РАН при шлиховом опробовании осадочных толщ и рыхлых отложений доказана рудоносность чокрак-караганских кварцевых песчаников на *Pt* и *Au*, на *Au* – литифицированных мезо-кайнозойских песчаников, черных сланцев, доломитов, зон ожелезнения и сидеритовых конкреций [Багатаев, 2013; Мацапулин и др., 2009, 2011; Черкашин и др., 2012]. На Курушском рудном поле (составная часть СБМЗ) поисковыми работами «Дагестаннедра» в 2009-2019 гг. была выявлена связь *Au* с черносланцевыми толщами и с зонами жильного кварц-сульфидного (пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит) оруденения. Золотоносность среднемиоценовых песчаников прослежена ИГ ДНЦ РАН на расстояние 180 км – от долины р. Сулак до р. Рубасчай. Ширина золотоносных выходов чокрак-караганских отложений достигает 10 км при мощности непрерывной золотоносности до 20-25 м. Максимальные размеры золотинок – до 0,13 мм, пробность – 780-800%. Большая часть золотинок претерпела дальний перенос, а меньшая имеет «рудный» облик и может быть связана с местными коренными проявлениями. Среднее содержание *Au* варьирует от 0,3 до 4,4 г/т, *Pt* – от 0,6 до 14,35 г/т, *Pd* – от 0,3 до 2,7 г/т

[Мацапулин и др., 2009, 2011]. Самородная *Pt* образует изометричные пластинки размером до 0,2 мм при незначительной окатанности [Черкашин и др., 2012]. Терригенные *Au* и *Pt* могут быть связаны с погребенными россыпями в чокрак-караганских песчаниках. Наиболее перспективными для поиска благородных металлов считаются прибрежно-морские россыпи [Черкашин и др., 2012].

ОАО «Севкавгеология», ГУП РЦ «Дагестангеомониторинг» и ФГУП «ЦНИГРИ» проводили работы по выявлению «крупнообъемного» *Au* оруденения в углеродсодержащих толщах на юго-востоке Дагестана, где в СБМЗ выделяются Белокано-Аварский и Ахтычай-Самурский рудные районы [Багатаев, 2013]. В СБМЗ колчеданное оруденение локализовано на двух стратиграфических уровнях – верхнетоарско-нижнеааленском и верхнеааленском (*Su* с *Co* и полиметаллическое); также выявлено *Au* оруденение черносланцевого типа с золото-полиметаллическим составом руд. Перспективными на обнаружение «крупнообъемного» *Au* оруденения считаются Филизчай-Мачхалорский, Хнов-Борчинский и Куруш-Мазинский рудные узлы [Багатаев, 2013]. Содержащие *Au* и *Ag* руды Куруш-Мазинского рудного узла представлены пиритом, галенитом и сфалеритом; реже – халькопиритом, арсенопиритом, пирротинном, вюртцитом, марказитом, гематитом, лимонитом и блёклой рудой. Субмикроскопическое *Au* (в основном, в пирите) не обнаруживается под микроскопом. При помощи электронного микроскопа установлены мелкие (5-8 мкм) частицы *Au* изометричной и пленочной формы [Багатаев, 2013]. Среднее содержание *Ag* варьирует от 15 до 17 г/т.

Ранее считалось, что на Северном Кавказе потенциально рудоносными на ЭПГ являются три описанные выше источника БМ. В последние годы установлены повышенные содержания благородных металлов (*Au*, *Ag*, *Pt*, *Ru*, *Pd*) в промышленных отходах ФОФ, перерабатывавшей руды Как-Х и Кад-Х полиметаллических месторождений [Гурбанов и др., 2020а]. Полученные нами данные могут расширить перспективы обнаружения тоар-ааленского золото-платиноидного с полиметаллами оруденения в черносланцевых толщах ЮФО РФ, так как можно прогнозировать его наличие не только в пределах Горной Осетии (в полосе шириной до 2,5 км и протяженностью до 28 км в междуречье Фиагдон – Геналдон), но и, возможно, в СБМЗ – от Дагестана до Краснодарского края. Для этого необходимо проанализировать надежными количественными методами на *Pt*, *Pd*, *Ru*, *Rh*, *Ir* дубликаты проб со значимыми содержаниями *Au* и *Ag*, имеющиеся у геологических организаций, ранее проводивших поисковые работы на *Au* в этом регионе.

Выводы

Повышенные содержания БМ в пробах, взятых из керна скважин Фиагдонского хвостохранилища, можно объяснить наличием как в рудах полиметаллических Какадур-Ханикомского и Кадат-Хампаладагского месторождений, так и во вмещающей их тоар-ааленской углеродсодержащей черносланцевой толще нового для Северного Кавказа золото-платиноидного с полиметаллами оруденения.

Литература

1. Багатаев Р.М. Золото-сульфидное оруденение черносланцевых толщ Горного Дагестана. // Разведка и охрана недр. – 2013. – №6. – С. 3-8.
2. Богуш И. А. Благородные металлы углеродсодержащей формации Передового хребта Северного Кавказа. // V международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов. – Т. 2. – М.: МГГА, 2001. – С. 190-191.

3. Богущ И. А., Рябов Г. В., Кафтанатий А. Б. Минералы платиновой группы в аллювии бассейна рек Уруп – Большая Лаба (Северный Кавказ). // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 435. № 3. – С. 357-360.
4. Богущ И. А., Бурцев А. А., Черкашин В. И. Благородные металлы в черных сланцах Уруп-Лабинского района Северного Кавказа. // Материалы V научно-технической конференции «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» (пос. Верхний Фиагдон, с. Барзыкау, Республика Северная Осетия – Алания, 22-25 октября 2015 г.). – Владикавказ. – 2015. – С. 34-39.
5. Богущ И. А., Черкашин В. И., Рябов Г. В., Абдуллаев М. Ш. Новый тип оруденения благородных металлов на Северном Кавказе. // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466. № 2. – С. 193-195.
6. Богущ И. А., Бурцев А. А., Рябов Г. В. Минералы благородных металлов и их источники на Северном Кавказе. // Наука юга России. – 2017. – Т. 13. № 2. – С. 34-40.
7. Богущ И. А. Геохимические особенности рудоносных черных сланцев Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – № 3. – С. 6-17.
8. Буряк В. А., Гончаров В. И., Горячев Н. А. Эволюционный ряд крупнообъемных золото-платиноидных месторождений в углеродистых толщах. // Доклады РАН. – 2002. – Т. 387. № 4. – С. 512-515.
9. Буряк В. А., Гончаров В. И., Горячев Н. А., Цымбалюк Н. В., Абиссалов Э. Г. О соотношении кварцевожильной золотой и вкрапленной золото-сульфидной минерализаций с платиноидами в черносланцевых толщах. // Доклады РАН. – 2005. – Т. 400. № 1. – С. 56-59.
10. Буряк В. А., Горячев Н. А., Сидоров В. А. и др. Основные литостратиграфические уровни юго-востока Яно-Колымского золотоносного пояса, благоприятные для локализации оруденения. // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. Билибинские чтения. Том 2. Металлогения. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. – С. 143-145.
11. Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. и др. Платиноносность золоторудных месторождений в черносланцевых толщах Северо-Востока России: проблемы и перспективы. // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI веке. – М.: Геоинформмарк, 1995. – Т. 2. Кн. 2. – С. 156-161.
12. Гурбанов А. Г., Туаев О. П., Газеев В. М., Лексин А. Б., Гурбанова О. А., Лолаев А. Б. Полиметаллическое и золото-сульфидно-кварцевое с ЭПГ оруденение в тоар-ааленских углеродисто-терригенных флишеидных (черносланцевых) толщах Фиагдон-Терской металлогенической подзоны Самуро-Белореченской металлогенической зоны (Северный Кавказ). // Вестник Владикавказского научного центра РАН. – 2020а. – Т. 20. № 3. С. 59-69.
13. Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Лексин А. Б., Газеев В. М., Гурбанова О. А., Лолаев А. Б., Оганесян А. Х. О возможности обнаружения промышленного ранне-среднеюрского полиметаллически-золото-платиноидного оруденения черносланцевого типа в Северной Осетии (часть 1). // Геология и геофизика Юга России. – 2020б. – Т. 10. № 4. – С. 6-29.
14. Котельников Е. Е., Истомин В. А., Сидоренко К. Ю., Вильданов Д. И. Отчет «Китайская Народная Республика: геология и полезные ископаемые». – М.: ЦНИГРИ, 2019. – 102 с.
15. Лазаренков В. Г., Смыслов А. А., Тихомиров Л. И. Платинометалльные провинции России. // Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов. – СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 1998. – С. 210-230.
16. Мацапулин В. У., Юсупов А. Р., Черкашин В. И. Первые находки терригенного золота, платины в миоценовых отложениях Восточного Кавказа (Дагестан). // Доклады РАН. – 2009. – Т. 424. № 6. – С. 792-795.
17. Мацапулин В. У., Юсупов А. Р., Черкашин В. И. Золотоносность среднемиоценовых (чокрак-караганских) песчаников северного склона Альпийского орогена Восточного Кавказа. // Материалы научно-практической конференции. Труды Института геологии ДНЦ РАН. – Махачкала. – 2011. – С. 37-44.

18. Парада С. Г. О платиноносности Северного Кавказа. // Проблемы геологии, планетологии, геоэкологии и рационального природопользования. Материалы VII международной научно-практической конференции (Новочеркасск, 1 декабря 2009 г.). – Новочеркасск: Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ, 2009. – С. 10-13.

19. Парада С. Г. Предпосылки и признаки платиноносности гипербазитовых массивов Северного Кавказа. // Наука юга России. – 2017. – Т. 13. № 1. – С. 59-73.

20. Ханчук А. И., Плюснина И. П., Молчанов В. П. Первые данные о золото-платиноидном оруденении в углеродистых породах Ханкайского массива и прогноз крупного месторождения благородных металлов в Приморском крае. // Докл. РАН. – 2004. – Т. 397. № 4. – С. 524-529.

21. Черкашин В. И., Мацапулин В. У., Юсупов А. Р., Тулышева Е. В., Хлопкова М. В. Условия формирования и закономерности локализации повышенных концентраций драгоценных металлов в мезо-кайнозойских отложениях Восточного Кавказа и перспективы их промышленного освоения. // Проблемы минерализации России. / Под ред. Д. В. Рундквиста, Н. С. Бортникова, Ю. Г. Сафонова. – М.: Изд. ГЦ РАН, 2012. – 534 с.

22. Черницын В. Б. Изотопный состав серы полиметаллических месторождений Северного Кавказа. // Геология рудных месторождений. – 1971. – № 3. – С. 100-105.

23. Черницын В. Б. Металлогения Большого Кавказа. – М.: Недра, 1977. – 191 с.

24. Черницын В. Б., Андрущук В. Л., Рубцов Н. Ф. Металлогенические зоны Центрального и Северо-Западного Кавказа. – М.: Недра, 1971. – 208 с.

25. Coveney R. M., Chen N. Nickel-molibdenum-platinum-gold deposits in black shales of Southern China – new ore type with possible analogs in Pennsylvanian rocks of the USA. // US Geol. Survey. – 1989. – Circ. No. 1058. – pp. 9-11.

26. Fan Delian, Yang Ruiying, Huang Zhongzi and. The Lower Cambrian black shale series and iridium anomaly in South China. // Contribution to the 27th International Geological Congress. – Moscow. – 1984. – pp. 215-224.

27. Hodge V. P., Stallard M., Koide M., Goldberg E. D. Platinum and palladium anomaly in the marine environment. // Earth Planetary Science Letters. – 1985. – Vol. 72. No. 2-3. – pp. 158-162.

28. Nikishin A. M., Ziegler P. A., Panov D. I., et al. Mesozoic and Cenozoic evolution Scythian Platform – Black Sea – Caucasus domain. // P. A. Ziegler, W. Cavazza and A. H. F. Robinson, S. Grasquin-Soleau (eds.). Pri-Tethys Memoir 6. Pri-Tethys Rift. / Wrench Basins and Passive Margins. Memoires du Museum natural d'Histoire naturelle. – Paris. – 2001. – Vol. 186. – pp. 296-346.

29. Sparrow G. J., Woodcock J. T. Some mineralogical and metallurgical factors in the recovery of platinum-group elements from ores. // Abstr. VIth International Platinum symposium. – Perth, W. Australia. – 1991. – pp. 48-49.

References

1. Bagataev R. M. Gold-sulfide mineralization of black shale strata of Gorny Dagestan. Exploration and protection of mineral resources, 2013. No. 6. pp. 3-8. (In Russ.)

2. Bogush I. A. Noble metals of the carbon-bearing formation of the Foremost Ridge of the North Caucasus. In: Proceedings of the V International Conference “New Ideas in Earth Sciences”. Vol. 2. Moscow. MGGA, 2001. pp. 190-191. (In Russ.)

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

4. Bogush I. A., Burtsev A. A., Cherkashin V. I. Noble metals in black shales of the Urup-Labinsk region of the North Caucasus. In: Proceedings of the V scientific and technical conference

“Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus” (RNO-A, October 22-25, 2015). Vladikavkaz, 2015. pp. 34-39. (In Russ.)

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

6. Bogush I.A., Burtsev A.A., Ryabov G.V. Minerals of noble metals and their sources in the North Caucasus. Science of the South of Russia, 2017. Vol. 13. No. 2. pp. 34-40. (In Russ.)

7. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I., Isaeva N.A. Geochemical features of metalliferous black shale of North Caucasus. Geology and Geophysical of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 6-17. (In Russ.)

8. Buryak V.A., Goncharov V.I., Goryachev N.A. Evolutionary series of large-volume gold-platinoid deposits in carbonaceous strata. Reports of RAS, 2002. Vol. 387. No. 4. pp. 512-515. (In Russ.)

9. Buryak V. A., Goncharov V.I., Goryachev N.A., Tsybalyuk N. V., Abissalov E. G. On the ratio of quartz-veined gold and disseminated gold-sulfide mineralization with platinoids in black shale strata. Reports of RAS, 2005. Vol. 400. No. 1. pp. 56-59. (In Russ.)

10. Buryak V.A., Goryachev N.A., Sidorov V.A. et al. The main lithostratigraphic levels of the southeast of the Yano-Kolyma gold-bearing belt, favorable for the localization of mineralization. Problems of geology and metallogeny of Northeast Asia at the turn of the millennium. Bilibino readings. Vol. 2. Metallogeny. Magadan, SVKNII FEB RAS, 2001. pp. 143-145. (In Russ.)

11. Goncharov V.I. Voroshin S.V., Sidorov V.A. et al. Platinum-bearing gold deposits in the black shale strata of the North-East of Russia: problems and prospects. Platinum of Russia. Problems of the development of the mineral resource base of platinum metals in the XXI century. Moscow. Geoinformmark, 1995. Vol. 2. Book. 2. pp. 156-161. (In Russ.)

12. Gurbanov A.G., Tuae O.P., Gazeev V.M., Leksin A.B., Gurbanova O.A., Lolaev A.B. Polymetallic and gold-sulfide-quartz with PGE mineralization in the Toar-Aalenian carbonaceous-terrigenous flyschoid (black shale) strata of the Fiagdon-Tersk metallogenic subzone of the Samur-Belorechensk metallogenic zone (North Caucasus). Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of the RAS, 2020a. Vol. 20. No. 3. pp. 67-70. (In Russ.)

13. Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Ya., Lexin A.B., Gazeev V.M., Gurbanova O.A., Lolaev A.B., Oganessian A.Kh. On the possibility of detecting of industrial Early-Middle Jurassic polymetallic-gold-platinoid mineralization of the black-shale type in North Ossetia (Part 1). Geology and Geophysical of Russian South. 2020b. Vol. 10. No. 4. pp. 6-29. (In Russ.)

14. Kotelnikov E. E., Istomin V.A., Sidorenko K.Yu., Vil'danov D.I. Report “People’s Republic of China: Geology and Minerals”. Moscow. TSNIGRI, 2019. 102 p. (In Russ.)

15. Lazarenkov V.G., Smyslov A.A., Tikhomirov L.I. Platinum provinces of Russia. Large and unique deposits of rare and noble metals. Saint-Petersburg. Saint-Petersburg Mining Institute, 1998. pp. 210-230. (In Russ.)

16. Matsapulin V.U., Yusupov A.R., Cherkashin V.I. The first finds of terrigenous gold, platinum in the Miocene deposits of the Eastern Caucasus (Dagestan). Reports of RAS, 2009. Vol. 424. No. 6. pp. 792-795. (In Russ.)

17. Matsapulin V.U., Yusupov A.R., Cherkashin V.I. Gold content of the Middle Miocene (Chokrak-Karagan) sandstones of the northern slope of the Alpine orogen of the Eastern Caucasus. In: Proceedings of the Institute of Geology, DSC RAS. Makhachkala, 2011. pp. 37-44. (In Russ.)

18. Parada S.G. About the platinum content of the North Caucasus. Problems of geology, planetology, geoecology and rational nature management. In: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference (Novocherkassk, December 1, 2009). Novocherkassk. Publ. YRSTU, 2009. pp. 10-13. (In Russ.)

19. Parada S.G. Preconditions and signs of platinum content of the hyperbasite massifs of the North Caucasus. Science of the Russian South, 2017. Vol. 13. No. 1. pp 59-73. (In Russ.)

20. Khanchuk A.I., Plyusnina I.P., Molchanov V.P. The first data on gold-platinoid mineralization in carbonaceous rocks of the Khanka massif and the forecast of a large deposit of

precious metals in the Primorsky Territory. Reports of RAS, 2004. Vol. 397. No. 4. pp. 524-529. (In Russ.)

21. Cherkashin V.I., Matsapulin V.U., Yusupov A.R., Tulysheva E.V., Khlopkova M.V. Formation conditions and localization patterns of high concentrations of precious metals in the Meso-Cenozoic deposits of the Eastern Caucasus and the prospects for their industrial development. Problems of Minerageny in Russia. Moscow. Publ. GC RAS, 2012. 534 p. (In Russ.)

22. Chernitsyn V.B. Sulfur isotopic composition of polymetallic deposits in the North Caucasus. Geology of ore deposits, 1971. No. 3. pp. 100-105. (In Russ.)

23. Chernitsyn V.B. Metallogeny of the Greater Caucasus. Moscow. Nedra, 1977. 191 p. (In Russ.)

24. Chernitsyn V.B., Andrushchuk V.L., Rubtsov N.F. Metallogenic zones of the Central and Northwestern Caucasus. Moscow. Nedra, 1971. 208 p. (In Russ.)

25. Coveney R.M., Chen N. Nickel-molibdenum-platinum-gold deposits in black shales of Southern China – new ore type with possible analogs in Pennsylvanian rocks of the USA. US Geol. Survey, 1989. Circ. No. 1058. pp. 9-11.

26. Fan Delian, Yang Ruiying, Huang Zhongzhi. The Lower Cambrian black shale series and iridium anomaly in South China. Contribution to the 27th International Geological Congress. Moscow. 1984. pp. 215-224.

27. Hodge V.P., Stallard M., Koide M., Goldberg E.D. Platinum and palladium anomaly in the marine environment. Earth Planetary Science Letters, 1985. Vol. 72. No. 2-3. – pp. 158-162.

28. Nikishin A. M., Ziegler P. A., Panov D. I., et al. Mesozoic and Cenozoic evolution Scythian Platform – Black Sea – Caucasus domain. Pri-Tethys Memoir 6. Pri-Tethys Rift. Wrench Basins and Passive Margins. Memoires du Museum natural d'Histoire naturelle. Paris. 2001. Vol. 186. pp. 296-346.

29. Sparrow G.J., Woodcock J.T. Some mineralogical and metallurgical factors in the recovery of platinum-group elements from ores. In: Abstr. VIth International Platinum symposium. Perth, W. Australia. 1991. pp. 48-49.

УДК 551.21

DOI: 10.46698/VNC. 2021.34.18.002

Оригинальная статья

Новые данные об извержениях грязевых вулканов в Азербайджане

Ад. А. Алиев ¹, Г. Д. Етирмишли ²

¹Институт геологии и геофизики Национальной Академии наук Азербайджана, Республика Азербайджан, AZ1143, г. Баку, ул. Г. Джавида, 119;

²Национальная Академия Наук Азербайджана, Республиканский Центр Сейсмологической Службы, Республика Азербайджан, AZ1001, г. Баку, ул. Г. Джавида, 123, e-mail: gyetirmishli@gmail. com

Статья поступила: 22.03.2021, доработана: 16.04.2021, принята к публикации: 11.05.2021

Резюме: Актуальность работы. Статья посвящена новым извержениям самых активных грязевых вулканов Шамахи-Гобустанского региона Восточного Азербайджана – Шихзарли и Гушчу, характеризующихся частыми проявлениями. Так, начиная с 1844 г. зарегистрировано 26 извержений грязевого вулкана Шихзарли, одно из которых, наиболее интенсивное произошло в феврале 1902 г. после катастрофического Шамахинского землетрясения. **Цель исследования.** Рассмотрены геологическая позиция грязевых вулканов, сейсмологические данные, определившие глубину очага и энергию извержения, дан краткий исторический обзор извержений. **Методы исследования.** Геологическое строение площадей расположения грязевых вулканов изложено на основе новых данных, полученных в последние годы о тектонике грязевулканических районов Азербайджана, в частности Гобустана, с выделением разломных структур и расположенных между ними микроблоков, а также тектонических единиц – аллохтон, паравтохтон и автохтон. В одном из таких микроблоков (Баянатынский) расположен грязевой вулкан Шихзарли, относящийся к паравтохтону. Почти все извержения грязевых вулканов Шихзарли и Гушчу, а также последние их проявления спровоцированы землетрясениями, происшедшими в близкорасположенных к ним районах и отмечены 5-7 сейсмостанциями. Предыдущее извержение грязевого вулкана Гушчу в Шамахинском районе в январе 2020 года явилось следствием подземных толчков в соседнем Исмаиллинском районе. В историческом обзоре рассматриваемых грязевых вулканов отмечены характерные и отличительные особенности их проявлений. Последнее (16-е) извержение грязевого вулкана Гушчу произошло из нового эруптивного центра, на расстоянии 700 м к северу от основного действующего более ста лет кратера вулкана. **Результаты работы.** Приведены результаты геохимического анализа вулканической брекчии, особенно нефтеносных пород – песчаников и горючих сланцев эоцен-миоценовых отложений для оценки перспектив нефтегазоносности площадей расположения изученных грязевых вулканов. В пределах Баянатынского микроблока нефтегазовые скопления могут быть открыты под грязевулканическим очагом.

Ключевые слова: вулканическая брекчия, микроблоки, аллохтон, паравтохтон, автохтон, сейсмичность, эпицентр, волновые формы, очаг землетрясения.

Для цитирования: Алиев Ад. А., Етирмишли Г. Д. Новые данные об извержениях грязевых вулканов в Азербайджане. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.34.18.002.

DOI: 10.46698/VNC.2021.34.18.002

Original paper

New data on eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan

Ad. A. Aliyev ¹, G. D. Yetirmishli ²

¹Institute of Geology and Geophysics Azerbaijan National Academy of Sciences, 119 Guseyn Javid Str., Baku AZ1143, Azerbaijan;

²National Academy of Sciences of Azerbaijan Republican Seismic Survey Center, 123 Guseyn Javid Str., Baku AZ1001, Azerbaijan, e-mail: gyetirmishli@gmail.com

Received: 22.03.2021, revised: 16.04.2021, accepted: 11.05.2021

Abstract: Relevance. The article is devoted to new eruptions of the most active mud volcanoes Shikhzarli and Gushchu in the Shamakhi-Gobustan region of East Azerbaijan. These volcanoes are characterized by frequent manifestations. Thus, since 1844, 26 eruptions of the Shikhzarli mud volcano have been recorded. The most intense eruption occurred in February 1902 after the catastrophic Shamakhi earthquake. **Aim.** The geological position of mud volcanoes, seismological data that determined the depth of the source and the energy of the eruption are considered. A brief historical review of the eruptions is given. **Methods.** The geological structure of the areas where mud volcanoes are located is presented on the basis of new data obtained in recent years on the tectonics of mud volcanic regions of Azerbaijan. In particular for this reason was used Gobustan, with the identification of fault structures and microblocks located between them, as well as tectonic units – allochthon, parautochthon and autochthon. In one of these microblocks (Bayanata), there is the Shikhzarli mud volcano, which belongs to the parautochthon. Almost all the eruptions of the Shikhzarli and Gushchu mud volcanoes, as well as their last manifestations, are induced by earthquakes that have occurred in the regions close to them and are registered by 5-7 seismic stations. The previous eruption of the Gushchu mud volcano in the Shamakhi region in January 2020 was the result of tremors in the neighboring Ismayilli region. In the historical review of the considered mud volcanoes, characteristic and distinctive features of their manifestations are noted. The last (16th) eruption of the Gushchu mud volcano occurred from a new eruptive center, at a distance of 700 m to the north of the main crater of the volcano that has been active for more than a hundred years. **Results.** The results of geochemical analysis of volcanic breccias, especially oil-bearing rocks – sandstones and oil shales of Eocene-Miocene deposits are presented to assess the prospects for oil and gas content of the areas where the considered mud volcanoes are located. Within the Bayanata microblock, oil and gas accumulations can be discovered under a mud volcanic chamber.

Keywords: volcanic breccia, microblocks, allochthon, parautochthon, autochthon, seismicity, epicenter, wave forms, earthquake source.

For citation: Aliyev Ad. A., Yetirmishli G. D. New data on eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): xx-xx. DOI: 10.46698/VNC.2021.34.18.002.

Введение

Территория Азербайджана является уникальным и классическим регионом развития грязевого вулканизма. Из известных на нашей планете 2500 грязевых вулканов около 400 находится в пределах Южнокаспийского нефтегазоносного бассейна и из них более 350 на суше Восточного Азербайджана и прилегающей акватории Каспия. При этом, здесь встречаются все формы грязевулканических проявлений:



*Рис. 1. Вулкан Шихзарли. Излияние вулканической брекчии /
Fig. 1. Shikhzarli volcano. Effusion of volcanic breccia*

действующие, потухшие, погребенные, подводные, островные, обильно нефтewделяющие.

Ежегодно в Азербайджане происходит 3-5 извержений, а в отдельные годы повышения сейсмической активности в смежных районах расположения грязевых вулканов – до 10 и более пароксизмов извержений. Так, за последние два столетия (начиная с 1810 г.) на 93 грязевых вулканах было зафиксировано 437 извержений.

2021 год опять начался с активизации грязевулканической деятельности в Азербайджане и извержения самых активных грязевых вулканов Шамахи-Гобустанского региона – Шихзарли и Гушчу. Так, 09 января извергался Шихзарли в Центральном Гобустане, а 23 числа, ровно через две недели, в Шамахинском районе активизировался Гушчу, как обычно вынося на земную поверхность из недр вулканическую брекчию, теперь уже из нового эруптивного центра.

Вулкан Шихзарли (рис. 1) расположен в 70 км к запад-северо-западу от Баку и в 38 км к югу-востоку от г. Шамахи. Это крупный вулкан с абсолютной высотой 640 м, относительной – 150 м, с пологим южным и крутым северным склонами. Грязевулканической брекчией в объеме 705 млн м³ покрыта площадь в 350 га.

Вулкан Гушчу расположен в 20 км к югу от г. Шамахи, недалеко от одноименного селения. Он небольшой по размерам, морфологически представляет возвышенность высотой 12 м и с диаметром кратерного поля 52х60 м. Мощность вулканической брекчии в пределах 100 м, ее площадь более 700 м [Грязевые вулканы..., 1971].

На Шихзарли произошло 3 фазы извержений (каждая продолжительностью 2-7 мин.). Общая продолжительность процесса 12,5 мин. Извержение произошло с выбросом брекчии на высоту примерно 10-20 м без обычного воспламенения газа и столба пламени.

Извержение Гушчу также произошло вечером, без воспламенения газа, продолжалось всего 2 минуты и в отличие от предыдущих его проявлений сопровождалось выносом из недр безводной, сухой вулканической брекчии (рис. 2).



Рис. 2. Вулкан Гушчу. Покров вулканической брекчии в новом эруптивном центре /
Fig. 2. Gushchu volcano. A cover of volcanic breccia in the new eruptive center

Методы исследования

Геология площадей расположения изученных грязевых вулканов рассмотрена на основе полученных в последние годы новых данных о тектонике грязевулканических областей Азербайджана, особенно Шамахи-Гобустанского региона. Проанализированы сейсмические события, происшедшие в сопредельных районах за месяц до извержений и отмеченные сейсмостанциями, а также сейсмические данные, определившие глубину очага и энергию извержения. Выполнены геохимические анализы образцов пород, выбросов грязевых вулканов, особенно нефтеносных и горючих сланцев, методом их экстракции. Определено количество органического вещества и пиролиза с целью оценки перспектив нефтегазоносности площадей нахождения грязевых вулканов.

Геологическое строение района исследования. Грязевой вулкан Шихзарли находится в пределах Баянатынского (Центральный Гобустан) микроблока и при-

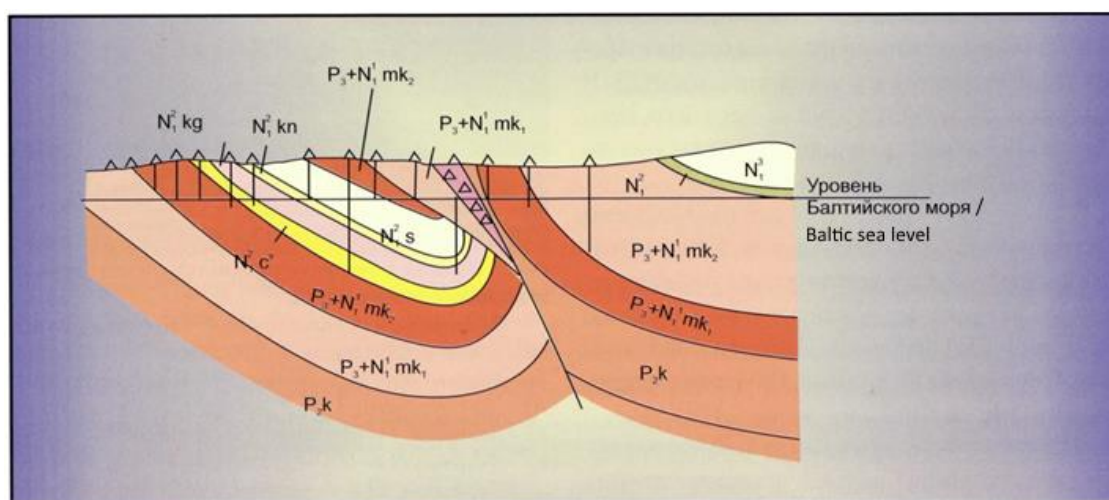


Рис. 3. Геологический профиль через вулкан Шихзарли /
Fig. 3. Geological section through the Shikhzarli volcano

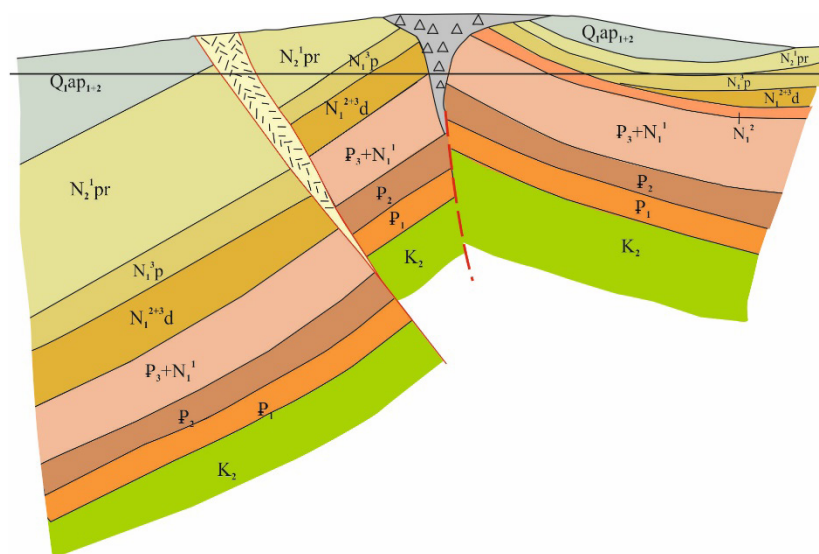


Рис. 4. Геологический профиль через грязевой вулкан Гушчу /
Fig. 4. Geological section through the mud volcano Gushchu

урочен к вытянутой в широтном направлении Шихзарлинской антиклинальной складке длиной 12 км и шириной 3,5-4,0 км, которая сложена отложениями эоцен-миоцена. Присводовая часть складки осложнена продольным нарушением с амплитудой смещения до 1500 м, свод надвинут на южное крыло. С надвигом связан грязевой вулкан (рис. 3).

В геологическом строении площади нахождения вулкана Гушчу принимают участие осадочные породы возраста от верхнего палеогена до верхнего плиоцена включительно. Вулкан приурочен к сводовой части асимметричной, местами опрокинутой на юг антиклинали и связан с Аджичайским надвигом (рис. 4).

Баянатынский микроблок, сложенный отложениями нижнего структурного этажа кайнозоя (палеоген-миоцен), обладает более напряжённой тектоникой, обусловленной многочисленностью линейных антиклиналей, осложнённых осепродольны-

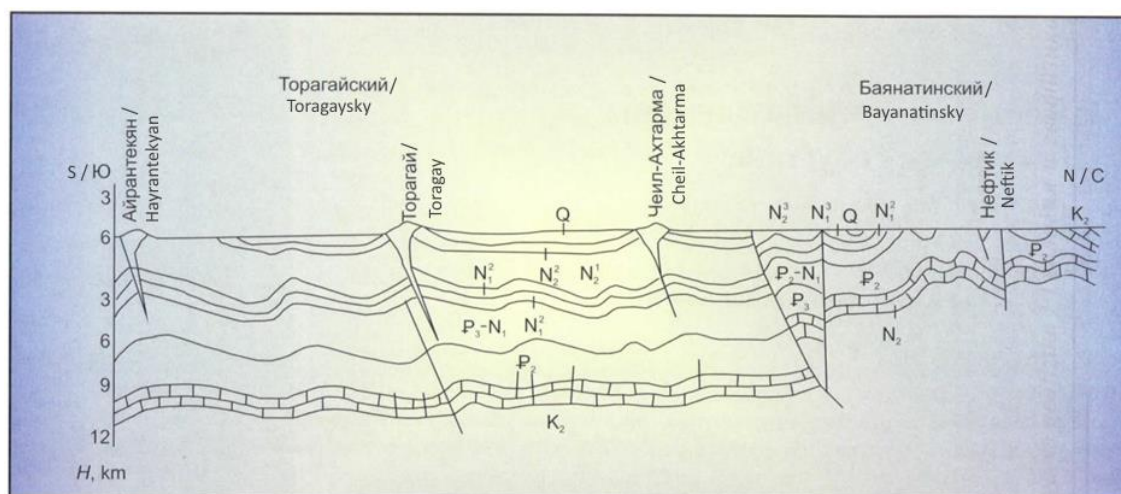


Рис. 5. Геологический профиль через Баянатынский и Торагайский микроблоки
(M 1:250000) [Алиев, Байрамов, 2000] /
Fig. 5. Geological section through the Bayanat and Toraga microblocks
(Scale 1: 250000) [Aliiev, Bairamov, 2000]

ми разломами типа взбросов, и разделяющих их узких синклиналей. В пределах микроблока кровля верхнего мела залегает неглубоко, а мощность разреза составляет 2,5-4,5 км [Алиев, Байрамов, 2000].

В последние годы нами в Гобустане выделены тектонические единицы – аллохтон, паравтохтон и автохтон, соответствующие ранее выделенным региональным структурам: Северный Гобустан, Баянатынский микроблок (Центральный Гобустан), Торагайский микроблок (Южный Гобустан) (рис. 5) [Алиев, Байрамов, 2007].

Паравтохтон является движущей частью основания автохтона и сложен преимущественно отложениями нижнего структурного этажа, характеризуется двухэтажным тектоническим строением и сложен теми же фациями, что и автохтон, но оторванными от него в южном направлении движением вышележащих покровов (аллохтона) и увлечёнными на небольшое расстояние. Поэтому паравтохтон обладает автономными грязевулканическими очагами, сообщаемыми вдоль разломов субширотного и субдолготного простирания с таковыми автохтона.

Автохтон, рассматриваемый в составе Торагайского микроблока, представлен всеми структурными ярусами кайнозоя и характеризуется частыми извержениями грязевых вулканов, спровоцированными землетрясениями. Так, извержения

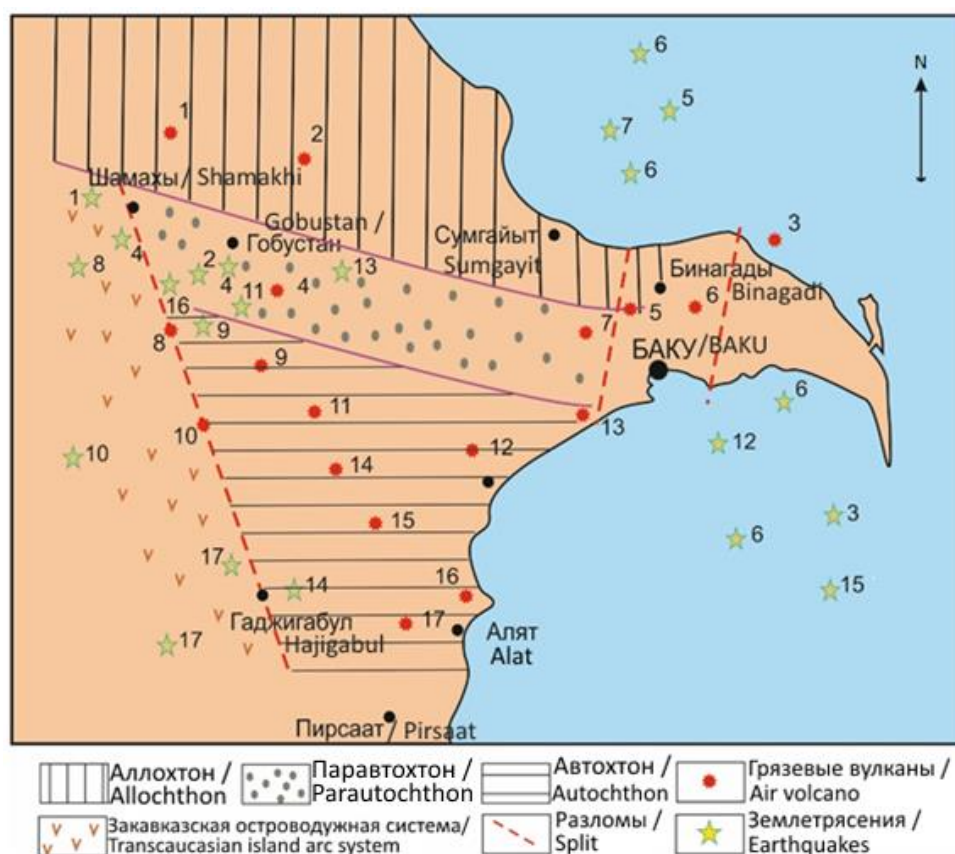


Рис. 6. Влияние сейсмичности на активизацию грязевулканической деятельности:

1. Гызмейдан; 2. Гасымкенд; 3. Бузовна пильпиляси; 4. Шихзарли; 5. Кечалдаг; 6. Кейреки; 7. Боздаг-Гобу; 8. Гушчу; 9. Нардаранахтарма; 10. Ахтармаарды; 11. Агнохур; 12. Отманбоздаг; 13. Локбатан; 14. Дурандаг; 15. Агтирме; 16. Бахар; 17. Айрантекен [Алиев, Байрамов, 2007] /

Fig. 6. Influence of seismicity on the activation of mud volcanic activity:

1. Gyzmeidan; 2. Gasymkend; 3. Buzovna pil'pilyasi; 4. Shikhzarli; 5. Kechaldag; 6. Keireki; 7. Bozdag-Gobu; 8. Gushchu; 9. Nardaranakhtarma; 10. Akhtarmaardy; 11. Agnokhur; 12. Otmanbozdag; 13. Lokbatan; 14. Durandag; 15. Agtirme; 16. Bakhar; 17. Airanteken [Aliiev, Bairamov, 2007]

вулканов Агнохур (29.06.1986 г.), Айрантежян (20.03.1988 г., 22.08.2004 г.), Бахар (03.10.1992 г.), Нардаранахтарма (10.1996 г.), Аггирме (12.2000 г.) и Дурандаг (01.2001 г., 18.08.2004 г.), спровоцированы землетрясениями с гипоцентрами в Гобустане и Нижнекуринском районе (см. рис. 6) [Алиев, Байрамов, 2007].

Краткий исторический обзор извержений. Большинство извержений грязевого вулкана Шихзарли (а их было 25) сопровождалось возгоранием газа, столбом пламени, достигающим высоты 100-300 м, и сравнительно небольшим объёмом выброшенной на поверхность земли грязевулканической брекчии. Извержения вулкана происходили в основном через каждые 2-6 лет. Большие интервалы покоя отмечены в 1848-1868, 1872-1902–1927, 1929-1939 и 1955-1969 гг., сильные извержения имели место в XIX и в начале XX века.

Наиболее интенсивное извержение, продолжавшееся двое суток и сопровождавшееся большим объёмом вынесенной из недр брекчии (48 тыс. м³), покрывшей

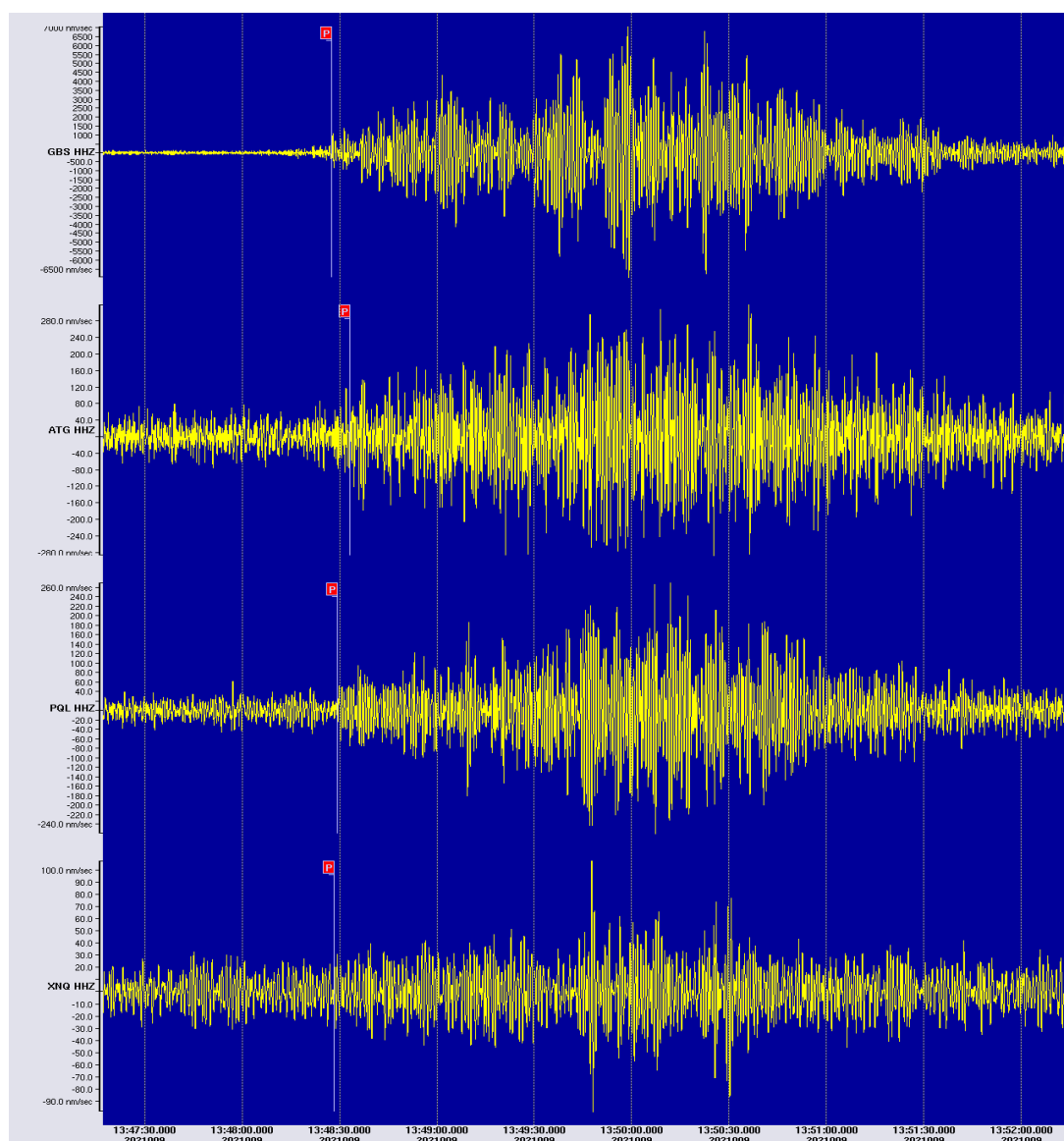


Рис. 7. Цифровые записи волновых форм по станциям Гобустан, Алтыагач, Пиргули, Сиазан, Хыналыг /

Fig. 7. Digital waveform records at the stations Gobustan, Altyagach, Pirguli, Siazan, Khynalyg

площадь в 4,3 га, произошло 13 февраля 1902 г., вскоре после известного катастрофического Шамахинского землетрясения. При извержении в 1955 г. вулканом был также выброшен сравнительно большой объём брекчии – 19,5 тыс. м³, покрывшей площадь в 1,3 га. Весной 1939 г. после извержения в течение 10 дней наблюдалось горение газа. Начиная с 40-х годов, извержения вулкана происходят в основном с незначительным объёмом выброшенной брекчии в пределах 1,0-2,0 тыс. м³.

Почти все извержения на вулкане Гушчу сопровождались, как обычно подземным гулом, выбросом вулканической брекчии, воспламенением газа. Интересно отметить, что высота пламени в 1917, 1941 и 1992 годах достигала 100-200 м, а продолжительность извержения (1992 г.) составляла с перерывами 2 часа. В 1913 году, при его первом извержении образовались два потока излияния, длина одного из которых 10 м, а другого – 700 м. В 1960 г. кратерное поле было дислоцировано, и из трещин выделялся газ. А самое сильное извержение вулкана было зафиксировано в марте 1986 г., когда была выброшена брекчия в объёме 12 тысяч кубометров.

Нынешнее (16-е) извержение вулкана Гушчу по некоторым параметрам процесса его проявления заметно отличается от вышеописанных. Впервые «заработал» новый эруптивный центр на расстоянии 700 м к северу от основного, действующего на протяжении более ста лет кратера вулкана. Это извержение, как уже отметили, характеризовалось выбросом на земную поверхность необычной почти твердой брекчии. Январское 2021 г. извержение вулкана было кратковременным (2 минуты), но более бурным, взрывного характера, чем его предыдущие 2008, 2018 и 2019 годов с подземным гулом, выбросом вулканической брекчии на высоту 40-50 м.

Сейсмологические данные. Следует отметить, что почти все извержения вулканов Шихзарли и Гушчу были спровоцированы землетрясениями. Извержения после землетрясений, произошедшие во второй половине XIX и в начале XX вв., были

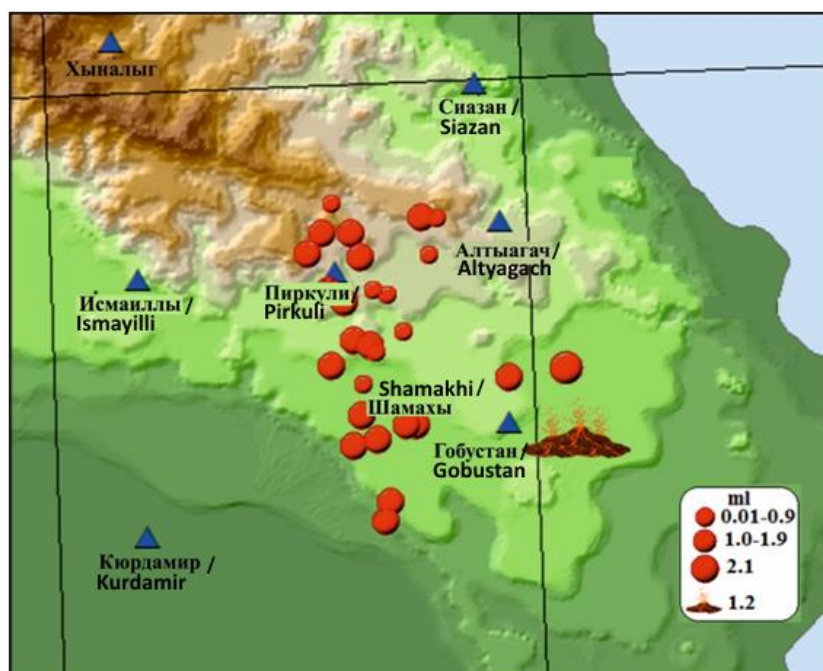


Рис. 8. Карта эпицентров землетрясений, зафиксированных 09.12.2020-08.01.2021 г. в зоне Гобустан-Шамахи-Пиргули-Исмаиллы /

Fig. 8. Map of the earthquake epicenters recorded on 09.12.2020-08.01.2021 in the Gobustan-Shamakhy-Pirguli-Ismailly zone

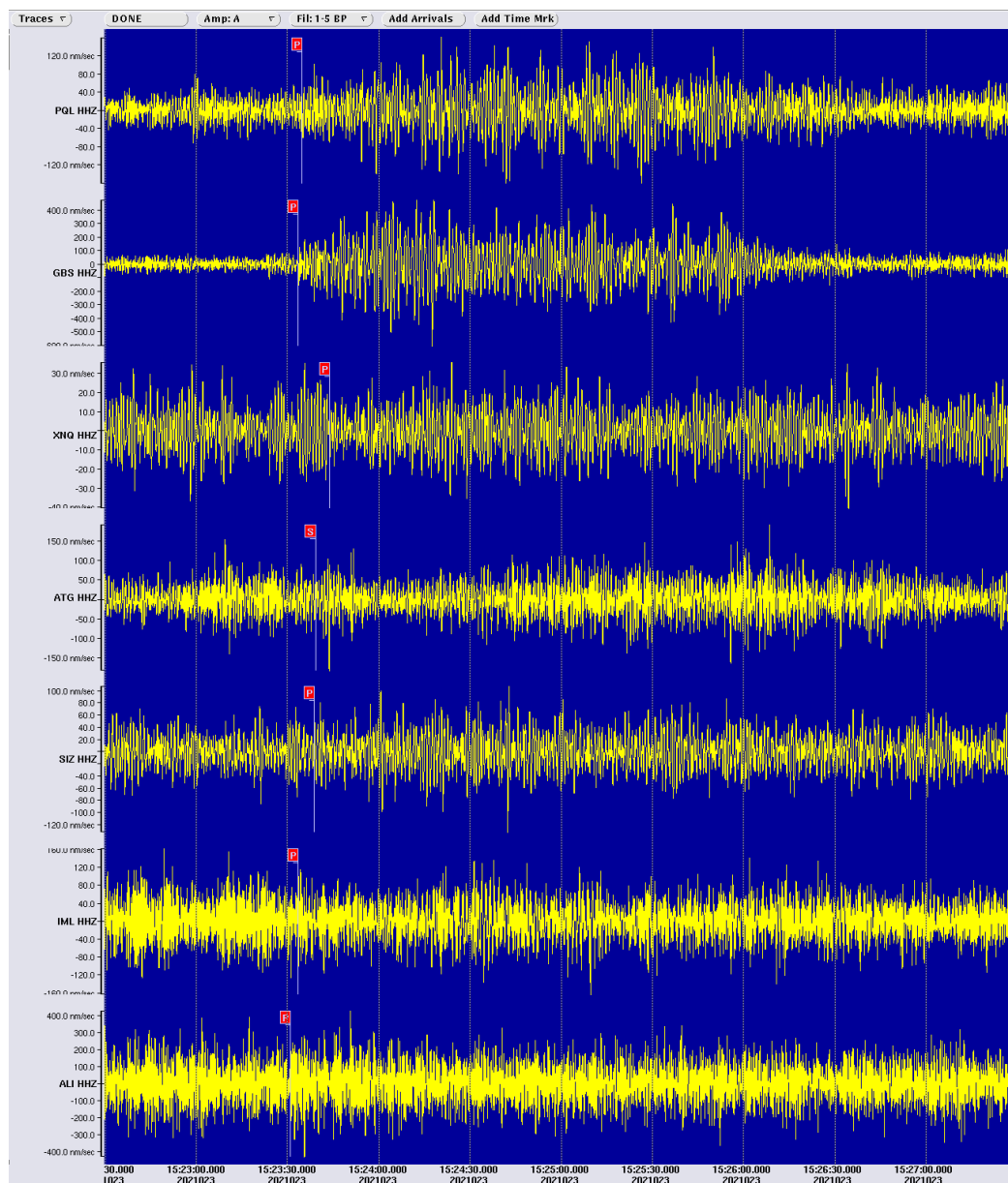


Рис. 9. Цифровые записи волновых форм по отмеченным 7 станциям /

Fig. 9. Digital waveform records for the indicated 7 stations

отмечены в работах [Абих, 1939; Бооц, 1865; Гамба, 1828; Вебер, 1903; Ковалевский, 1940; Малиновский, 1938; Мушкетов, Орлов, 1893; Салаев, Зейналов, 1956; Якубов и др., 1970]. Извержения грязевого вулкана Шихзарли в марте 2011 г. и в декабре 2013 г. также явились следствием серий землетрясений в этой зоне.

Вообще влияние землетрясений на активизацию грязевулканической деятельности также рассмотрены в работах [Ахмедбейли, 1975; Гулиев и др., 2010; Kazimova, 2020; Казымова, Казымов, 2020; Kopf et al., 2010; Kokh et al., 2017; Martinelli, Dadomo, 2003; Mellors et al., 2007; Панахи, Рахманов, 1993; Султанова, 1969 и др.].

Как уже отмечалось, на Шихзарли были зафиксированы 3 фазы активизации вулкана. Первая – в 17:48:36 продолжительностью 3,5 мин., вторая – в 17:53:59 (2 мин.) и третья – в 17:58:59 (7 мин.). Общая продолжительность извержения 12,5



Рис. 10. Карта эпицентров землетрясений, происшедших в близко расположенных районах от вулкана Гушчу (23.12.2020-23.01.2021) /

Fig. 10. Map of the earthquake epicenters that occurred in closely located areas from the Gushchu volcano (23.12.2020-23.01.2021)

минут. Общее количество выделенной энергии $E=0,96 \times 10^7$ Дж, глубина выброса вулканической брекции 2 км (рис. 7).

Это извержение Шихзарли также связано с сейсмическими событиями, произошедшими в сопредельных районах, отмеченными сейсмостанциями, расположенными в Шамахи-Гобустанском и Прикаспийском районах: Гобустан, Алтыагач, Пиркули, Сиазан, Хыналыг. С 20 декабря 2020 года до 9 января 2021 года было зафиксировано 27 слабых землетрясений с магнитудой до 2,1 (рис. 8).

И извержение Гушчу является следствием подземных толчков, произошедших в близлежащих к вулкану районах. Достаточно отметить, что начиная с 23 декабря 2020 г. до 23 января 2021 г. было зафиксировано несколько землетрясений с магнитудой 2,0-3,3, отмеченных семью станциями: Пиркули, Гобустан, Хыналыг, Алтыагач, Сиазан, Исмаиллы, Ширван. Извержение произошло в 19:23:24 ч., глубина выброса брекции 2 км, количество выделенной энергии $E=0,25 \times 10^7$ Дж. Извержение вулкана особенно спровоцировало Шемахинское землетрясение 13 января 2021 г. ($m_l < 3,3$) с гипоцентром в 40 км от вулкана. Кстати и предыдущее извержение Гушчу 13 января 2020 г. было спровоцировано Исмаиллинским землетрясением (рис. 9, 10).

Результаты работы и их обсуждение

После извержения на вулканах были проведены съёмочные работы – замеры выброшенного вулканом объема брекции, её толщины и площади покрова, отобраны образцы пород для лабораторного анализа.

На вулкане Шихзарли подсчитаны объём грязевулканической брекции (1,3 тыс. m^3), средняя толщина (0,6 м) и покров брекции (2,0 га). На поверхности брекции отмечены различного размера углубления – места падения крупных обломков пород, ряд радиальных трещин.

На вулкане Гушчу объём брекчии составил 27 тыс. м³, которая при средней ее толщине 0,9 м покрыла площадь в 3 га. В центральной части покрова толщина брекчии 1,5 м. В результате проведенных на вулкане работ было установлено, что от покрова брекчии в центральной части нового кратерного поля прослеживались 2 языка излияния, протяженностью до 100 м. К югу от вулкана отмечены трещины небольших глубин и ширины. В восточной части кратерного вала образовался небольшой водоем с интенсивным выделением газа.

В выбросах, как и в прошлые годы, встречены зеленоватые глины, глинистые сланцы, мергели, известняки, брекчиевидные доломиты, песчано-алевритовые породы, некоторые из которых пропитаны нефтью (рис. 11, 12).



Рис. 11. Горючий сланец. /
Fig. 11. Oil shale.



Рис. 12. Нефтеносный песчаник. /
Fig. 12. Oil-bearing sandstone.

Нефтеносные породы (песчаники) и горючие сланцы имеют высокое содержание органического вещества. По данным пиролиза образцов горючего сланца из выбросов грязевых вулканов Шихзарли и Гушчу количество органики в них составило 7,56% и 7,33% соответственно.

Ниже приводятся результаты экстракции образцов пород и определения количества органического вещества.

Таблица 1 / Table 1

Результаты экстракции образцов пород и определения количества органического вещества / Results of extraction of rock samples and determination of the organic matter amount

Вулканы / Volcanoes	Количество растворенного органического вещества, % / The amount of dissolved organic matter, %		Количество выделенного битума, % / The amount of allocated bitumen, %	Количество органического вещества, % / The amount of organic substance, %	Количество керогена, % / Kerogen amount, %
	Хлороформ / Chloroform	Спиртобензол (1:1) / Alcohol benzene (1:1)			
Шихзарли / Shikhzarli	0,44	0,97	1,41	21,9	6,15
Гушчу / Gushchu	2,54	5,80	8,34	39,7	34,02

Выводы

В изученных образцах пород наблюдаются повышенные содержания спирто-бензольного битума, свидетельствующие о сингенетичном характере выделенного большого количества органического вещества, при его зрелости способного продуцировать нефтегазовые углеводороды.

И в заключение надо отметить, что среди отобранных различных образцов пород преимущественно олигоцен-миоценового возраста интерес представляют обычно встречающиеся при извержениях в вулканической брекчии нефтеносные песчаники и горючие сланцы, результаты геохимического анализа которых, наряду с данными геолого-геофизических исследований могут быть использованы при оценке перспектив нефтегазоносности площади расположения грязевого вулкана Гушчу.

Исходя из предполагаемого нами двухэтажного тектонического строения правотехтона, в пределах Баянатынского микроблока, где находится грязевой вулкан Шихзарли, а также нефтегазопродуцирующих возможностей пород эоцен-миоценового комплекса следует положительно оценить перспективы нефтегазоносности этих отложений, запечатанных в нижнем этаже, под грязевулканическим очагом.

Литература

1. Абих Г.В. О появившемся на Каспийском море острове и материалы к познанию грязевых вулканов Каспийской области (пер. с немец. изд. 1863 г.). // Тр. Геол. ин-та АзФАН СССР. – 1939. – Т. 12. – С. 21-122.
2. Алиев Ад. А., Байрамов А. А.. Новые данные об особенностях проявления грязевого вулканизма в Шамахи-Гобустанском регионе. // Тр. ИГАН. – 2000. – № 28. – С. 5-17.
3. Алиев Ад. А., Байрамов А. А. Закономерности пространственно-временного распределения грязевых вулканов Южно-Каспийской впадины в свете новой тектонической концепции. // Тр. ИГАН. – 2007. – № 35. – С. 25-45.
4. Ахмедбейли Ф.С. Современная активность грязевых вулканов восточной части Азербайджана и ее связь с сейсмичностью // Докл. АН Азерб. – 1975. – Т. 31. № 8. – С. 61-64.
5. Бооц Х. Сведения о землетрясениях в Шемаха в 1848 и 1849 гг. // Газета «Кавказ». – 9 сентября 1865.
6. Вебер В.Н. Шемахинское землетрясение 31 января 1902 г. // Тр. Геологического комитета. – 1903. – Вып. 9. – 73 с.
7. Гамба Ж.Ф. Землетрясение и извержение новой огнедышащей горы близ Баку. // Сев. архив. – 1828. – Т. 34. № 7. – С. 161-162.
8. Гулиев И.С., Алиев Ч.С., Панахи Б.М., Копф А., Делил Г, Багирли Р.Дж. Мониторинг потока метана и сейсмичность на грязевых вулканах юго-восточного Кавказа. // Republican seismic survey center of Azerbaijan National Academy of science. Catalogue of seismofore casting research carried out in Azerbaijan territory in 2009. – 2010. – pp. 64-77.
9. Грязевые вулканы Азербайджанской ССР. Атлас. – Баку: Изд-во АН Азерб. ССР, 1971. – 258 с.
10. Ковалевский С.А. Грязевые вулканы Восточного Закавказья. // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1940. – № 6-7. – С. 19-27.
11. Малиновский Н.В. Сейсмы, сопровождающие грязевые извержение. // Тр. АзФАН СССР, сер. физ.-хим. Наук. – 1938. – Т. 3/38. – С. 65-74.
12. Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений Российской империи. – СПб. – 1893. – Т. 26. – 583 с.

13. Панахи Б. М., Рахманов Р. Р. Грязевулканические землетрясения. // Вулканология и сейсмология. – 1993. – № 2. – С. 98-103.
14. Салаев С. Г., Зейналов М. М. Извержение грязевого вулкана Шихзагирли. // Труды АЗИИ. – 1956. – Вып. 13. – С. 46-52.
15. Султанова З. З. Землетрясения Азербайджана. Каталог землетрясений Азербайджана (с 1139 по 1965 гг.). – Баку: Гянджлик, 1969. – 86 с.
16. Якубов А. А., Дадашев Ф. Г., Зейналов М. М. и др. О новейших извержениях грязевых вулканов юго-восточной части Большого Кавказа. – Баку: Элм, 1970. – 117 с.
17. Казымова С. Э., Казымов И. Э. Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений и GPS-станций. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 3. – С. 40-56. DOI: 10.46698/VNC. 2020.35.39.003.
18. Kazimova S. E. Redefinition of earthquake hypocenters by the double difference method. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2020. – Vol. 10 (4). – pp. 41-51. DOI: 10.46698/VNC. 2020.36.81.003.
19. Kokh S. N., Sokol E. V., Dekterev A. A. et al. The 2011 strong fire eruption of Shikhzarli mud volcano, Azerbaijan: a case study with implications for methane flux estimation. // *Environ. Earth Sci.* – 2017. – Vol. 76 (701). – 20 p.
20. Kopf A. J., Delisle G., Faber E. et al. Long-term in situ monitoring at Dashgil mud volcano, Azerbaijan: a link between seismicity, porepressure transients and methane emission. // *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*. – 2010. – Vol. 99 (Suppl. 1). – pp. 227-240.
21. Martinelli G., Dado A. Mud volcano monitoring and seismic events. // *Mud volcanoes, Geodynamics and Seismicity. NATO Science Series*. – Baku, 20-23 May 2003. – pp. 187-200.
22. Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112. DOI: 10.1029/2006JB004489.

References

1. Abikh G. V. About the island that appeared on the Caspian Sea and materials for the understanding of mud volcanoes in the Caspian region (translated from German ed. 1863). In: *Proceedings of Geological Institute AzFAN USSR*. 1939. Vol. 12. pp. 21-122. (In Russ.)
2. Aliyev Ad. A., Bayramov A. A. New data on the features of the manifestation of mud volcanism in the Shamakhi-Gobustan region. In: *Proceedings of IGANA*. 2000. No. 28. pp. 5-17. (In Russ.)
3. Aliyev Ad. A., Bayramov A. A. Regularities of the spatio-temporal distribution of mud volcanoes in the South Caspian basin in the light of a new tectonic concept. In: *Proceedings of IGANA*. 2007. No. 35. pp. 25-45. (In Russ.)
4. Akhmedbeyli F. S. Modern activity of mud volcanoes in the eastern part of Azerbaijan and its relationship with seismicity. *Doklady AS Azerbaijan*. 1975. Vol. 31. No. 8. pp. 61-64. (In Russ.)
5. Boots H. Information about earthquakes in Shemakha in 1848 and 1849. In: *Newspaper "Caucasus"*. September 9, 1865. (In Russ.)
6. Weber V. N. Shemakha earthquake of January 31, 1902. In: *Proceedings of Geological Committee*. 1903. Issue 9. 73 p. (In Russ.)
7. Gamba J. F. Earthquake and eruption of a new fire-breathing mountain near Baku. In: *Sev. archive*. 1828. Vol. 34. No. 7. pp. 161-162. (In Russ.)
8. Guliev I. S., Aliyev Ch. S., Panakhi B. M., Kopf A., Delil G., Bagirli R. J. Monitoring of methane flow and seismicity on mud volcanoes of the South-Eastern Caucasus. Republican seismic survey center of Azerbaijan National Academy of science. Catalog of seismo forecasting research carried out in Azerbaijan territory in 2009. 2010. pp. 64-77. (In Russ.)

9. Mud volcanoes of the Azerbaijan SSR. Atlas. Baku. Academy of Sciences of Azerbaijan. SSR, 1971. 258 p. (In Russ.)
10. Kovalevsky S.A. Mud volcanoes of the Eastern Transcaucasia. Azerbaijan oil industry. 1940. No. 6-7. pp. 19-27. (In Russ.)
11. Malinovsky N.V. Seismic events accompanying mud eruptions. In: Proceedings of AzFAN SSR, ser. physical and chemical Sciences. 1938. Vol. 3/38. pp. 65-74. (In Russ.)
12. Mushketov I.V., Orlov A.P. Catalog of earthquakes of the Russian Empire. Saint Petersburg. 1893. Vol. 26. 583 p. (In Russ.)
13. Panakhi B.M., Rakhmanov R.R. Mud volcanic earthquakes. Volcanology and seismology. 1993. No. 2. pp. 98-103. (In Russ.)
14. Salaev S.G., Zeynalov M.M. The eruption of the Shikhsagirli mud volcano. In: Proceedings of AzII. 1956. Issue 13. pp. 46-52. (In Russ.)
15. Sultanova Z.Z. Earthquakes in Azerbaijan. Azerbaijan earthquake catalog (from 1139 to 1965). Baku, Ganjlik, 1969. 86 p. (In Russ.)
16. Yakubov A.A., Dadashev F.G., Zeynalov M.M. et al. About the latest eruptions of mud volcanoes in the southeastern part of the Greater Caucasus. Baku, Elm, 1970. 117 p. (In Russ.)
17. Kazimova S.E., Kazimov I.E. Geodynamics of the Talish region according to earthquake source mechanisms and GPS-stations. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10 (3). pp. 40-56. DOI: 10.46698/VNC. 2020.35.39.003. (in Russ.)
18. Kazimova S.E. Redefinition of earthquake hypocenters by the double difference method. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10 (4). pp. 41-51. DOI: 10.46698/VNC. 2020.36.81.003.
19. Kokh S.N., Sokol E.V., Dekterev A.A. et al. The 2011 strong fire eruption of Shikhsarli mud volcano, Azerbaijan: a case study with implications for methane flux estimation. Environ. Earth Sci. 2017. Vol. 76 (701). 20 p.
20. Kopf A.J., Delisle G., Faber E. et al. Long-term in situ monitoring at Dashgil mud volcano, Azerbaijan: a link between seismicity, porepressure transients and methane emission. Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.). 2010. Vol. 99 (Suppl. 1). pp. 227-240.
21. Martinelli G., Dado A. Mud volcano monitoring and seismic events. Mud volcanoes, Geodynamics and Seismicity. NATO Science Series. Baku, 20-23 May 2003. pp. 187-200.
22. Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. DOI: 10.1029/2006JB004489.

УДК 550.812

DOI: 10.46698/VNC. 2021.68.77.003

Оригинальная статья

Роль геодинамического напряжения в формировании нефтегазовых структур в Каспийском море (на примере месторождений Шахдениз, Умид, Бабек, Булла-Дениз)

Г. О. Велиев 

Республиканский Центр Сейсмологической Службы, Республика Азербайджан,
AZ1001, г. Баку, ул. Г. Джавида, 123, e-mail: humbat2007@mail.ru

Статья поступила: 24.03.2021, доработана: 22.04.2021, принята к публикации: 12.05.2021

Резюме: Актуальность работы. В статье рассматривается геодинамическое напряжение в формировании нефтегазовых структур в пределах Каспийского моря (на примере нефтяных месторождений Шахдениз, Умид, Бабек и Булла Дениз). **Цель работы.** Была предложена теория формирования Каспийского бассейна на основе модели формирования мантийных плюмов. **Метод работы.** В данной методике предполагается, что в пределах мантийных плюмов происходит подъём вещества и вынос тепла из мантийных глубин. Считается также, что в головной части мантийного плюма происходит частичное плавление мантийного вещества и образуется магмогенерирующая область. Магма, формирующаяся в головной части, обычно имеет щёлочно-базальтовый состав. При достижении мантийного плюма подошвы литосферы над ним проявляется плюмовый магматизм: происходит внедрение интрузий в земную кору и вдоль границы земной коры и мантии. В статье отмечено, что в области, охватываемой Палео-Каспием, магма переместилась из мантийного слоя на поверхность Земли, изменила свою структуру вблизи поверхности Земли, а область, очерченная локальными аномальными полями в гравитации и магнитных полях, соответствовала палеокаспийской морфологии. Зоны сейсмической активности и круговые региональные разломы, в условиях геодинамического напряжения современного Каспийского бассейна считаются признаками плюмового процесса. **Результаты работы.** Установлено, что сильные землетрясения с относительной магнитудой $M \geq 6-8$ происходят в диапазоне глубин 7-20 км. В северной дуге Южного Каспия, где активность плюма все еще присутствует в интервале 55-65 км в базальтовом слое, в этом интервале наблюдаются признаки деформации в соответствии с характерными очагами землетрясения. Геодинамическое напряжение, накопленное в результате горизонтальных, вертикальных и круговых движений, создаваемых плюмом в мантии, повлияло на динамику осадочного слоя до глубины 25 км, границы Конрада 20-32 км 40-53 км, и границы Мохо до глубины 40-53 км, где постоянно менялась морфоструктура осадочного слоя. Процесс осаднения в бассейне Каспийского моря начался до мезозоя, и в течение юрского периода земная кора продолжала снижаться и примерно с такой же тенденцией происходило формирование бассейна. В результате вихревого движения, созданного магматическим шлейфом в Каспийском бассейне, выстроились кольцевые спиральные антиклинальные структуры (Бахар, Шах-Дениз, Абшерон, Шафаг, Машал, Бабек, Умид, Булла-Дениз, Асиман, Зафар и др.), где было накоплено большое количество углеводородного потенциала страны. Проанализированы стратиграфическо-литологические особенности отложений в структуре Умид и показано, что там запасы нефти и газа очень велики.

Ключевые слова: геодинамическое напряжение, модель тектоники плит, модель мантийного плюма, гравитационное поле, деформация, глубокие углеводородные залежи, миграция в глубокие слои, зона тектонического активного разлома.

Для цитирования: Велиев Г. О. Роль геодинамического напряжения в формировании нефтегазовых структур в Каспийском море (на примере месторождений Шахдениз, Умид, Бабек, Булла-Дениз). *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.68.77.003.

DOI: 10.46698/VNC. 2021.68.77.003

Original paper

The role of geodynamic stress in the formation of oil and gas structures in the Caspian Sea (on the example of the Shah Deniz, Umid, Babek, Bulla Deniz fields)

G. O. Veliev 

National Academy of Sciences of Azerbaijan Republican Seismic Survey Center, 123 Guseyn Javid Str., Baku AZ1001, Azerbaijan, e-mail: humbat2007@mail.ru

Received: 24.03.2021, revised: 22.04.2021, accepted: 12.05.2021

Abstract: Relevance. The article considers the geodynamic stress in the formation of oil and gas structures within the Caspian Sea (on the example of the Shah Deniz, Umid, Babek, Bulla Deniz fields). **Aim.** A theory for the formation of the Caspian basin was proposed based on the “mantle plume” model. **Methods.** In this technique, it is assumed that within the mantle plumes there is an uplift of matter and heat removal from the mantle depths. It is also believed that in the head of the mantle plume there is a partial melting of the mantle material and a magma-generating area is formed. The magma that is formed in the head is usually alkaline-basaltic composition. When the mantle plume reaches the base of the lithosphere, plume magmatism appears above it: intrusions are introduced into the earth's crust and along the border of the earth's crust and mantle. It is noted that in the area covered by the Paleo-Caspian, magma moved from the mantle layer to the Earth's surface. Thus, it changed its structure near the Earth's surface, and the area outlined by local anomalous fields in gravity and magnetic fields corresponded to the paleocaspian morphology. Zones of seismic activity and circular regional faults, under the geodynamic stress of the modern Caspian basin, are considered signs of a plume process. **Results.** It has been established that strong earthquakes with a relative magnitude of $M \geq 6-8$ occur in the depth range of 7-20 km. In the northern arc of the South Caspian, where plume activity is still present in the 55-65 km interval in the basalt layer, there are signs of deformation in this interval in accordance with the characteristic earthquake sources. Geodynamic stress accumulated as a result of horizontal, vertical and circular motions created by the plume in the mantle influenced the dynamics of the sedimentary layer to a depth of 25 km, the Conrad boundaries 20-32 km 40-53 km, and the Moho boundaries to a depth of 40-53 km. There the morphostructure of the sedimentary layer was constantly changing. The deposition process in the basin of the Caspian Sea began before the Mesozoic, and during the Jurassic period the earth's crust continued to decline and the formation of the basin took place with approximately the same tendency. As a result of the vortex movement created by the magmatic plume in the Caspian basin, the circular spiral anticlinal structures (Bahar, ShahDeniz, Absheron, Shafag, Mashal, Babek, Umid, BullaDeniz, Asiman, Zafar, etc.) were built. There was accumulated the large amount of the country's hydrocarbon potential. The stratigraphic and lithological features of deposits in the structure of Umidare analyzed and it is shown that there are very large reserves of oil and gas.

Keywords: geodynamic stress, plate tectonics model, mantle plume model, gravity field, deformation, deep hydrocarbon deposits, migration into deep layers, active tectonic fault zone.

For citation: Veliev G.O. The role of geodynamic stress in the formation of oil and gas structures in the Caspian Sea (on the example of the Shah Deniz, Umid, Babek, Bulla Deniz fields). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.68.77.003.

Введение

Каспийский бассейн занимает площадь 392 600 км² и имеет объем 78 648 км³, что составляет 44 % от общих водных ресурсов озер на Земле. Азербайджан, Грузия, Иран, Туркменистан, Казахстан, Россия, Турция и ее территория полностью или частично связаны с водами данного бассейна. Реки, протекающие через эти районы, продолжают заполнять Каспийский бассейн осадками. Из-за размеров и закрытого характера водосборного бассейна Каспийское море можно назвать климатическим индикатором планеты Земля. Его геоморфология, рельеф, форма основания осадочного бассейна, геолого-тектоническое строение дают большое основание полагать, что процесс «мантийного плюма» сыграл ключевую роль в формировании этой региональной геоструктуры [Хаин, 2003, 2005а, 2010; Allen et al., 2004].

Мощность осадочного чехла в Каспийском бассейне составляет 7-9 км в прибрежных районах Шах-Дениз, Умид, Бабек и т. д. В центральной части мощность осадочного слоя достигает более 18-25 км [Valiyev, 2016]. В туркменском секторе толщина осадочного слоя составляет более 20 км. Средняя плотность пород в исследуемом регионе составляет 2,65-2,85 г/см³, толщина слоя литосферы на периферии составляет 45-55 км, в центральной части 30-40 км. Гранитный слой в центральной части бассейна трудно проследить. Уровень Каспийского моря составляет около 26,75 метров ниже уровня моря, а самая глубокая точка – 1025 метров.

Формирование Каспийского моря началось в очень древний геологический период, в течение которого изменилась его геоморфологическая форма, произошло несколько фаз трансгрессии и регрессии с различными высотами и периодами уровня воды. В следующем геологическом периоде (около 70 миллионов лет назад) началась изоляция и постепенное отделение Понтокаспийского бассейна от океана Тетис и южных морей. В конце понтийского периода, в среднем плиocene (10 миллионов лет назад), огромное и закрытое Сарматское море, которое покрывало территорию, занятую современным Черным и Каспийским морями, было разделено на разные части, где позднее образовался отдельный изолированный бассейн – Каспийское море.

Геоморфология Каспийского моря. По геоморфологическим особенностям, физико-географическим условиям и геолого-тектоническому строению Каспийский бассейн делится на три части: Северный, Средний и Южный Каспийские бассейны. Около 130 крупных и малых рек впадают в бассейн Каспийского моря. Наибольшее количество осадков в бассейн приносят такие реки Волга, Терек, Кура, Гусарчай, Гудьялчай, Вальвалачай, Ленкоранчай и Астара. В Каспийском море всегда происходит круговорот воды. Круговорот воды, его направление и скорость течения влияют на накопление осадка и формирование рельефа морского дна. В Каспийском море выделяются Дербентская (788 м) и Ленкоранская (1025 м) впадины. Рельеф дна Южного Каспия характеризуется шельфом, континентальным склоном, глубокими впадинами и подводными поднятиями [Леонтьев и др., 1977]. Ширина шельфовой зоны чередуясь с крутыми скалистыми берегами и участками с песчаным грунтом на западном побережье составляет 43 км. В северной части шельфа преобладают равнины. Над Каспийским морем доминируют северо-западный, северный и юго-восточные ветры.

Среднемесячная температура воды в Каспийском море колеблется между 7-8°C на северо-востоке и 15-17°C на юге. Поскольку Каспийское море является закры-

тым водным бассейном, климатические условия, глубина моря и рельеф дна, а также физико-географические особенности побережья сыграли важную роль в процессе седиментации.

В Каспийском бассейне, в основном в южной части широко распространены грязевые вулканы. На Земле зарегистрировано более 2000 известных грязевых вулканов, из которых около 500 находится в Каспийском бассейне и 344 на территории Азербайджане. Грязевые вулканы наблюдаются в море в виде отдельных островков.

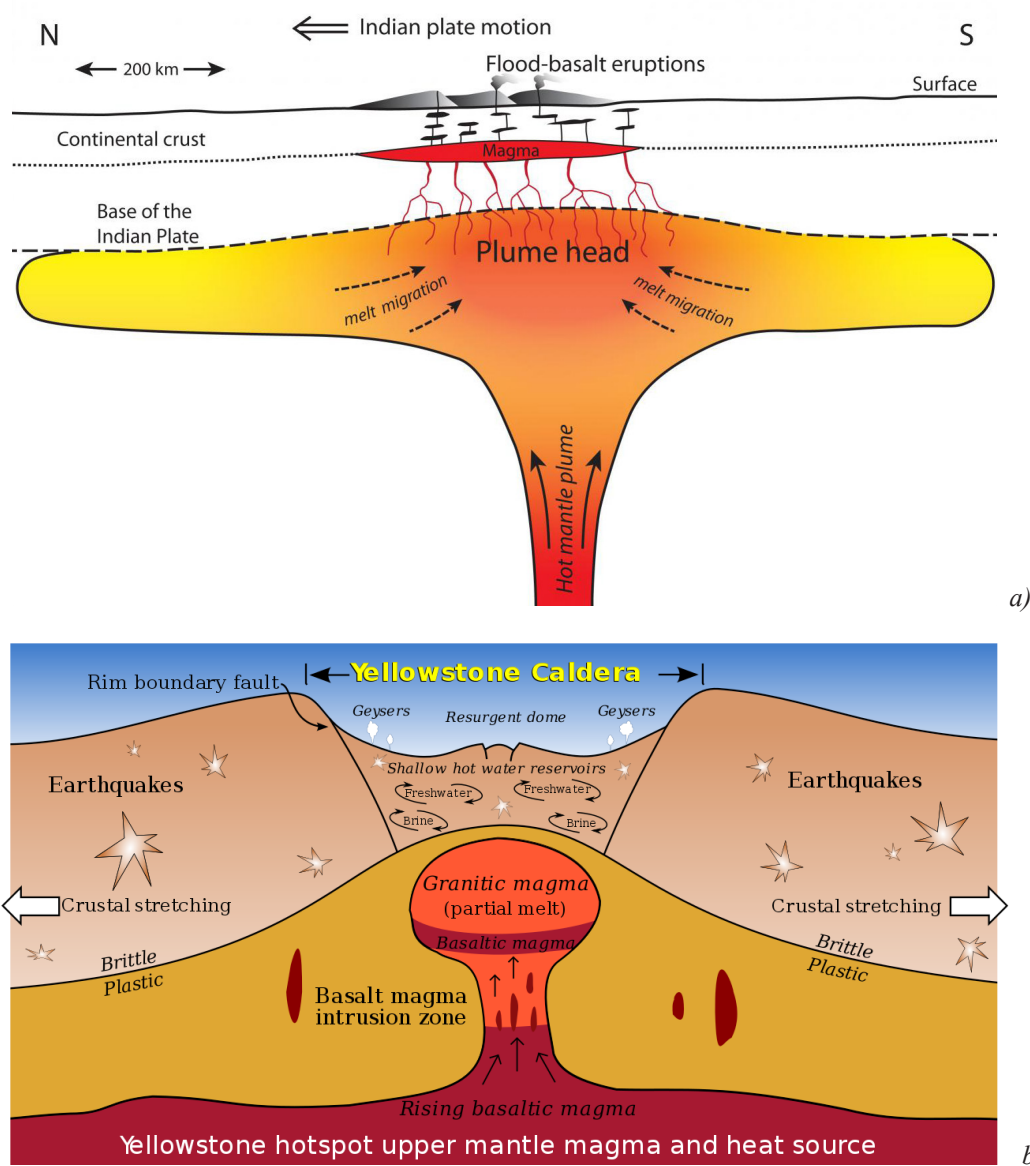


Рис. 1. Прогнозные схематические модели, созданные плюмом в зоне, соответствующей Каспийскому бассейну: а) вертикальные и горизонтальные смещения плюма, созданные тектоникой Индийской плиты [Richards et al., 2015]; б) диаграммы Йеллоустонской кальдеры, стадия формирования морфоструктуры плюма в слое литосферы (http://www.nps.gov/archive/yell/tours/fountainpaint/hotspot_yell.htm) /

Fig. 1. Predictive schematic models created by a plume in the zone corresponding to the Caspian basin: a) plume directed to the earth's crust, as well as vertical and horizontal displacements created by the lithosphere; b) spiral and various shapes during the movement of plywood to the earth's crust; c) the formation stage of the plume morphostructure in the lithosphere layer, cooling down and corresponding to the Caspian basin

Согласно палеогеологическим, палеогеографическим, археологическим и историческим данным, уровень Каспийского моря всегда менялся.

Формирование континентов и океанов на Земле вследствие глобальных тектонических процессов, механизма накопления энергии геодинамического напряжения в сейсмически активных зонах, образование месторождений полезных ископаемых, в основном нефтяных, а также генезис накопления в них углеводородов объясняются различными моделями. Научные геологические исследования данного региона были начаты в 1830 годах, где ученые изучали эндогенные процессы в прошлом, тектонические деформации и т. д. До 60-х годов XX века, основываясь на теории фиксизма, где моделировались геологические изменения в литосфере и происходило формирование геоструктур [Зоненшайн и др., 1990а, б; Хаин, 2005а, 2010; Allen et al., 2004]. После второй половины прошлого века измерительные приборы усовершенствовались, и сторонники мобилизма, которые показали, что литосфера

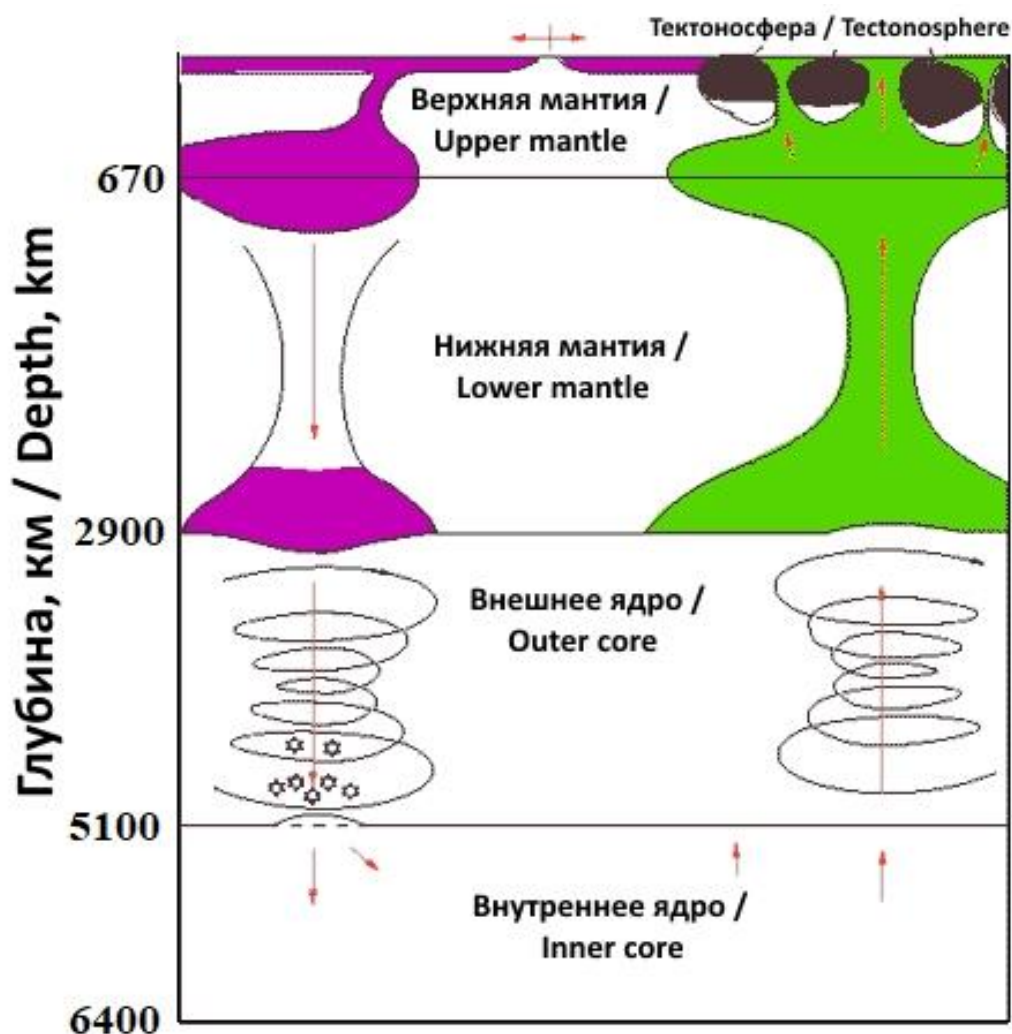


Рис. 2. Схема глобальной тектоники. Выделяются три главные геосферы с различно протекающими в них процессами: ядро, нижняя мантия и верхняя мантия с корой, объединяемая в тектоносферу. Стрелками показано движение вещества [Mariyama, 1994] /

Fig. 2. Model of the Caspian basin, corresponding to the model of the Plume mantle no [Mariyama, 1994]

делится на континентальный и океанический тип, создали модель тектоники плит, основанную на горизонтальных движениях. В настоящее время формирование Каспийского бассейна в соответствии с этой моделью объясняется многочисленными исследованиями, но новые данные, полученные в последние годы, выявили много особенностей, не соответствующих этой модели [Хаин, 2005а, 2010., Valiyev, 2016].

Метод исследования

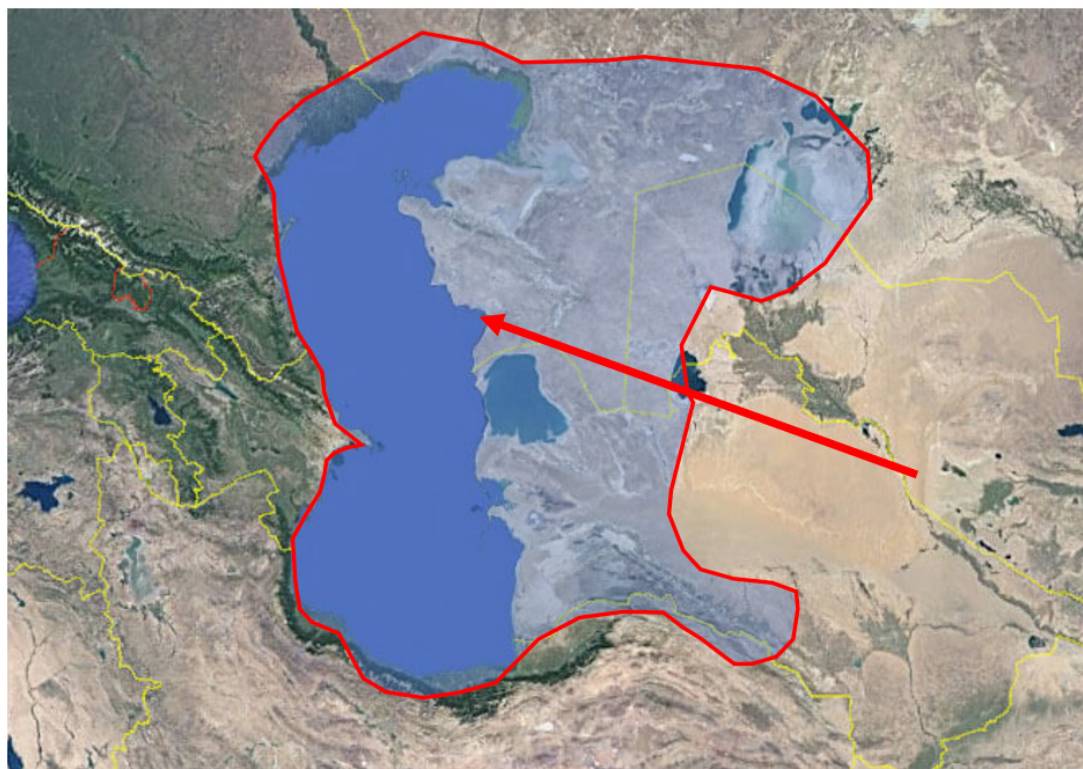
Принимая во внимание геофизические данные, собранные к настоящему времени в наших исследованиях, мы попытались проанализировать формирование Каспийского бассейна со ссылкой на модель, которая была предложена Ш. Маруямой [Хаин, 2003, 2005б; Maruyama, 1994], основанная на теории «мантии плюма» Тучо Уилсона выдвинутая в 1965 году. В этой модели в зоне перехода ядро-мантия, возбуждение магмы заставляет перемещаться плюм на поверхность [Грачев, 1996; Кузьмин, Ярмолюк, 2016; Maruyama, 1994] (рис. 1). Из схематических моделей, созданных под действием плюма в районе, соответствующем Каспийскому бассейну видно, что плюм двигался в направлении земной коры и создавал вертикальные и горизонтальные смещения в литосфере. Геодинамические условия окружающей среды менялись при различных движениях сплава во время передвижения плюма к земной коре. На рисунке 1б показан плюм, который начал охлаждаться в литосфере на примере Йеллоустонской кальдеры. В последствии сформировалась морфоструктура, вероятно соответствующая региону Каспийского бассейна, и эти процессы все еще продолжаются.

Плюм, который переместился к поверхности Земли из соответствующего мантийного слоя в зоне Палео-Каспийского региона, был основой для формирования этого бассейна. Изменилась морфоструктура плюма у поверхности земли, в определенные геологические периоды был активирован процесс магматизма, в некоторых районах были захоронены интрузии и извержения вулканов (рис. 2).

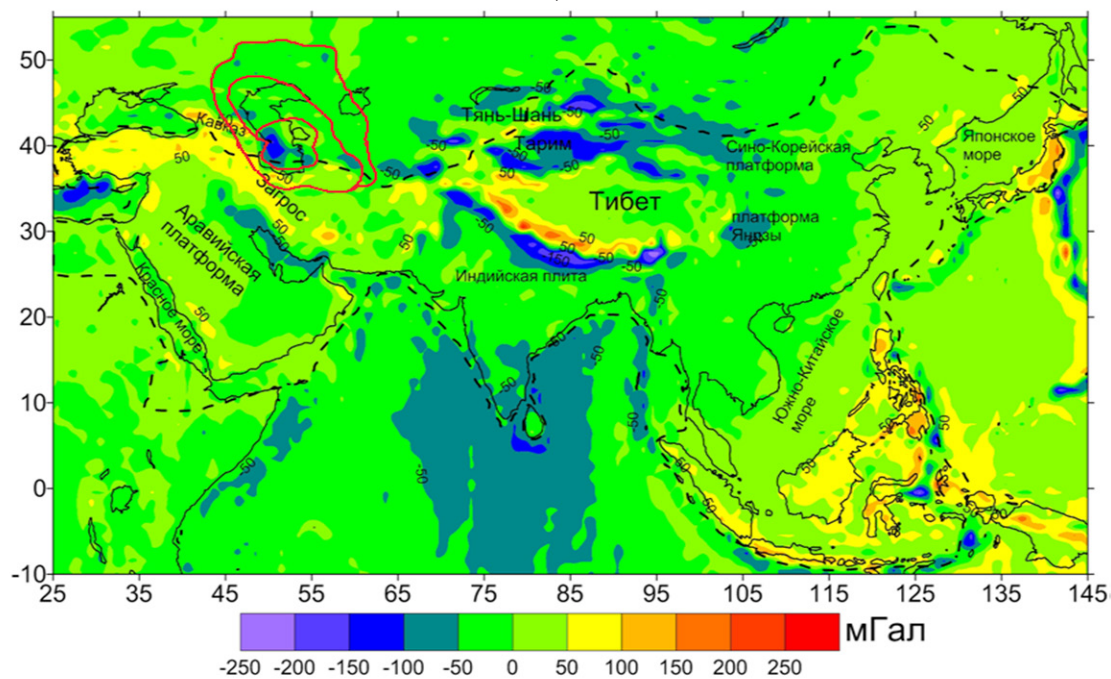
На следующих этапах активность плюма уменьшилась и как бы опустилась до стадии холодного затвердивания, и в его районе начал формироваться Каспийский бассейн. Морфоструктура депрессии, образованной массой плюма показана на рисунке 3 [Сеначин, Баранов, 2016]. Деятельность движения плюма создала большое количество тектонических разломов в верхних слоях земной коры. На карте, которая отражает тепловые условия, изменения температуры, также отражается кольцевая конфигурация Каспийского бассейна [Valiyev, 2016].

Зоны сейсмической активности Каспийского бассейна в соответствии с кольцевой формой и наблюдаемыми круговыми региональными разломами отражают современные геодинамические условия Каспийского бассейна [Гарагаш, Дубовская, 2009]. Отметим, что современные напряженно-деформированные условия Каспийского бассейна, зоны тектонических разломов, сейсмически активные районы, а также сильные землетрясения наблюдаются с фактами, связанными с плюм-мантийными процессами (рис. 4). Деформация пластов в геологических разрезах в направлении тектонических разломов по глубине прослеживается и формируется в виде дуги. Геодинамическое напряжение привело к образованию антиклинальных, синклиновых и других кольцевых структур в осадочном слое [Зоненшайн и др., 1990а, б].

В бассейне Куры методом глубинного сейсмического зондирования были проведены исследования и построены двухмерные профили. В профилях, разработанных на южном склоне Большого Кавказа (автор был участником сейсмических ис-



a)



b)

Рис. 3. Карты морфоструктуры палеоопасности (а), создаваемой плюмом, и площади современного Каспийского бассейна, очерченной характерным локальным минимумом в гравитационном поле [Зоненшайн и др., 1990а, б], (б) соответствующим «массе плюма» [Зоненшайн и др., 1990а, б];

Fig. 3. Maps of the paleo hazard morphostructure (a) created by the plume and the area of the modern Caspian basin, outlined by a characteristic local minimum in the gravitational field [Zonenshain et al., 1990a, b], (b) corresponding to the "plume mass" [Zonenshain et al., 1990a, b]

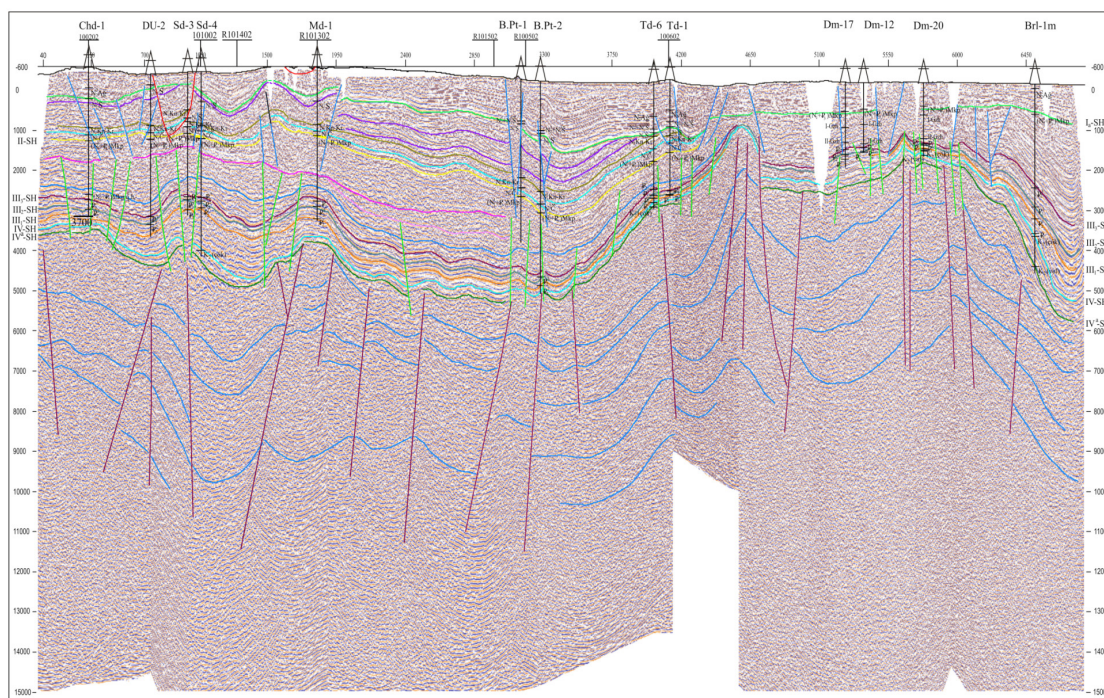


Рис. 4. Признаки деформации тектонических разломов, наблюдаемых в бассейне Куры по данным сейсморазведки /

Fig. 4. Deformation signs of tectonic faults observed in the Kura basin according to exploration seismology data

следований), было установлено, что признаки деформации тектонических разломов различны по сечению, а признаки деформации различны по глубине.

Наибольшая активность деформации и смещения в верхних слоях профилей наблюдается в двух интервалах от 50 до 100 м и от 3500 до 4000 м. При этом тектонические нарушения постепенно принимают косую форму [Valiyev, 2016].

На более глубоких интервалах (3500-9000 м) количество тектонических разломов уменьшается и значительно сохраняется их прежнее вертикальное направление, а признаки деформации в пластах относительно уменьшаются (рис. 4).

В бассейне Куры в региональных профилях имеются три глубинных интервала: от 50-100 м до 1500-2000 м, 4000-4500 м и 8000-10000 м, в которых наблюдаются как признаки деформации, так и визуальнo отчетливая картина в направлении тектонических разломов. В более глубоких слоях гранита и базальта признаки деформации уменьшаются, а тектонические разломы изменяются почти до первоначальных форм.

По данным GPS исследований были определены направление вектора и значение смещения современного горизонтального движения в каждой точке измерения [Етирмишли и др., 2019] (рис. 5). Были определены зоны геодинамических напряжений, места, где активность может возрасти, т. е. в зонах тектонических разломов и районах, где ожидаются сильные землетрясения. Согласно полученным результатам, в юго-восточной части Малого Кавказа наблюдаются максимальные скорости 9-12 мм/год, в то время как на Большом Кавказе было установлено 12 мм/год в северо-северо-восточном направлении [Kadirov et al., 2008]. Изменение направления движения Апшеронского полуострова на карте соответствует направлению кольцевого движения при смещении горизонтальных движений.

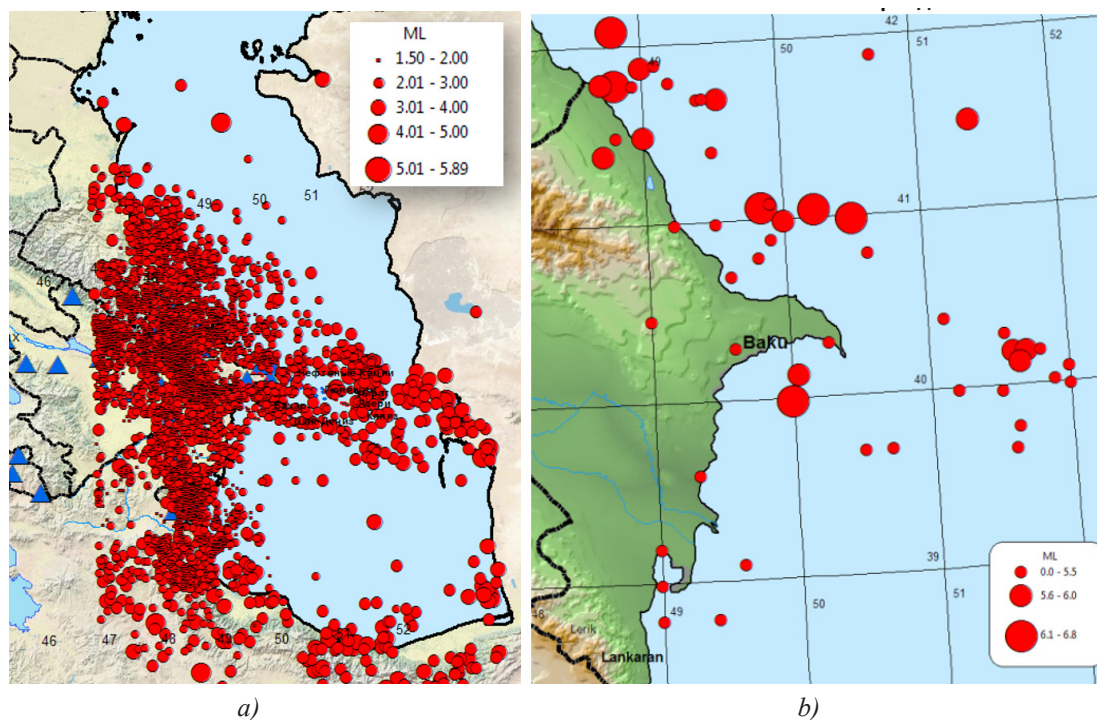


Рис. 5. Сейсмическая активность в зоне Каспийского бассейна а) и на территории Азербайджанской республики б) [Kazımova et al., 2020; Yetirmishli et al., 2019] /
Fig. 5. Seismic activity in the Caspian basin a) and on the territory of the Republic of Azerbaijan b) [Kazımova et al., 2020; Yetirmishli et al., 2019]

Изменения сейсмической активности наблюдаются и на карте эпицентров землетрясений для территории Азербайджана. Хотя количество землетрясений в диапазоне глубин 3-5 км велико, величина магнитуды не превышает $M \geq 4$. В этом интервале глубин деформация интенсивна на пересечениях разломов.

Хотя горизонтальные движения быстрые, возникающие тектонические нарушения и большое количество трещин уменьшают энергию растяжения. Сильные землетрясения с относительной магнитудой $M \geq 6-8$ происходят в диапазоне глубин 7-20 км и вызывают очень большой ущерб, включая гибель людей. Как видно из разрезов, основанных на сейсмических данных, признаки деформации в диапазоне 7-20 км не очень характерны. В результате чего, энергия геодинамического напряжения накапливается, и высвобождается во время внезапных событий-землетрясений [Казымова, Казымов, 2016; Valiyev, 2016]. Накопленная энергия напряжения в результате горизонтальных движений накапливается в центре и завершается внезапным тектоническим движением – землетрясением. Движение в механизме очага в виде взброса или сброса, не отражает движения тектонического блока. Геодинамическое напряжение, накопленное в результате горизонтальных, вертикальных и различных движений [Kadirov et al., 2008] в этом регионе, отражается в формировании морфоструктуры осадочного слоя до глубины 25 км, границы Конрада 20-32 км 40-53 км, и границы Мохо до глубины 40-53 км.

Результаты исследований

Энергия геодинамического напряжения вызывает снижение напряжения с выделением очень большого количества энергии во время большого количества

внезапных землетрясений. Эпицентры наблюдаются в зонах контакта блоков и в соответствии с тектоническими нарушениями внутри блока. Таким образом, морфоструктура и динамика активности гранитного, базальтового и осадочного слоев постоянно меняются. По нашему мнению, основной фактор, влияющий на такое изменение и модернизацию бассейна, был связан с процессами мантийного плюма. В рельефе разделительных границ этих слоев круговая конфигурация, создаваемая плюмом, разделяется и отражается в соответствующих геофизических полях [Veliyev, 2016].

Таким образом, учитывая выше сказанное, можно предположить, что в центре современной Южно-Каспийской впадины Каспийского бассейна в результате вихревого движения, создаваемого магматическим плюмом, и круговой циркуляции моря образовался осадочный комплекс толщиной более 25 км. В результате продолжающегося процесса в эти геологические периоды были сформированы кольцево-спиральные антиклинальные структуры (Бахар, Шах-Дениз, Абшерон, Шафаг, Машал, Бабек, Умид, Булла-Дениз, Асиман, Зафар и т. д.), в результате чего, здесь было накоплено большое количество углеводородного потенциала. Кольцево-спиральное расположение структур наблюдается в секторах южной части Каспийского моря [Астафьев, 2010; Керимов, Новрузов, 2012; Мамиесенов, Филин, 2011].

В целях обоснования возможности богатого углеводородного потенциала в глубоких пластах (в диапазоне 6-15 км и глубже) нами были рассмотрены геологические разрезы месторождений Шах-Дениз, Умид, Бабек. Хотя эти структуры были обнаружены после 1950-х годов, их наличие нефтяных и газовых месторождений было подтверждено после 1999 года.

В 2008-2012 гг. были обработаны и интерпретированы 16 сейсмических профилей длиной 103 км в направлении изучения тектонического строения плиоценовых отложений на участке Умид-Бабек. В 2012 году на участке Умид-Бабек были проведены 3D сейсмические работы на площади 1300² км. Здесь в скважине, пробуренной на глубину 6006 м, был вскрыт VII горизонт продуктивного пласта. В результате геофизических исследований скважин было установлено, что горизонты V и VII продуктивного пласта насыщены очень богатым газом. Сильный поток газа был получен с горизонта VII продуктивного пласта. В ходе анализа результаты геофизической разведки (ГИС) скважин, пробуренных на месторождении, сравнивались с геолого-геофизическими данными, полученными в близлежащих районах Шах Дениз, Нахчыван, Алат-Дениз, Зафар-Машал, Бахла и Булла-Дениз, а также были оценены наличие в этих структурах газовых, газоконденсатных месторождений.

В области структуры Умид, в глубоких слоях, на краях грязевого вулкана и во внешних частях структуры, слои менее сложны, чем в верхних слоях, создавая благоприятные условия для миграции углеводородов (рис. 6, 7). Хотя покрытие грязевого вулкана в верхних слоях расширилось из-за геодинамических напряжений, наблюдаемых в структуре месторождения Умид, форма структуры не меняется в более глубоких слоях, а форма антиклинала в слоях сохраняет свои особенности.

Структура Умид имеет вид асимметричной антиклинали вытянутая в направлении северо-запад-юго-восток, выраженная изогипсами на высоте 7000-7900 м. Ширина структуры 3,5-4,0 км и вытянутое на расстоянии 19 км. Он отражается в северо-восточном крыле с изогипсами 7000-8700 м и лежит под углом 16-24°. Юго-западное крыло, обозначенное 7000-8500 м, находится под плоским углом (26-45°). Самая глубокая часть синклинали окружена 9600-метровыми изогипсами.

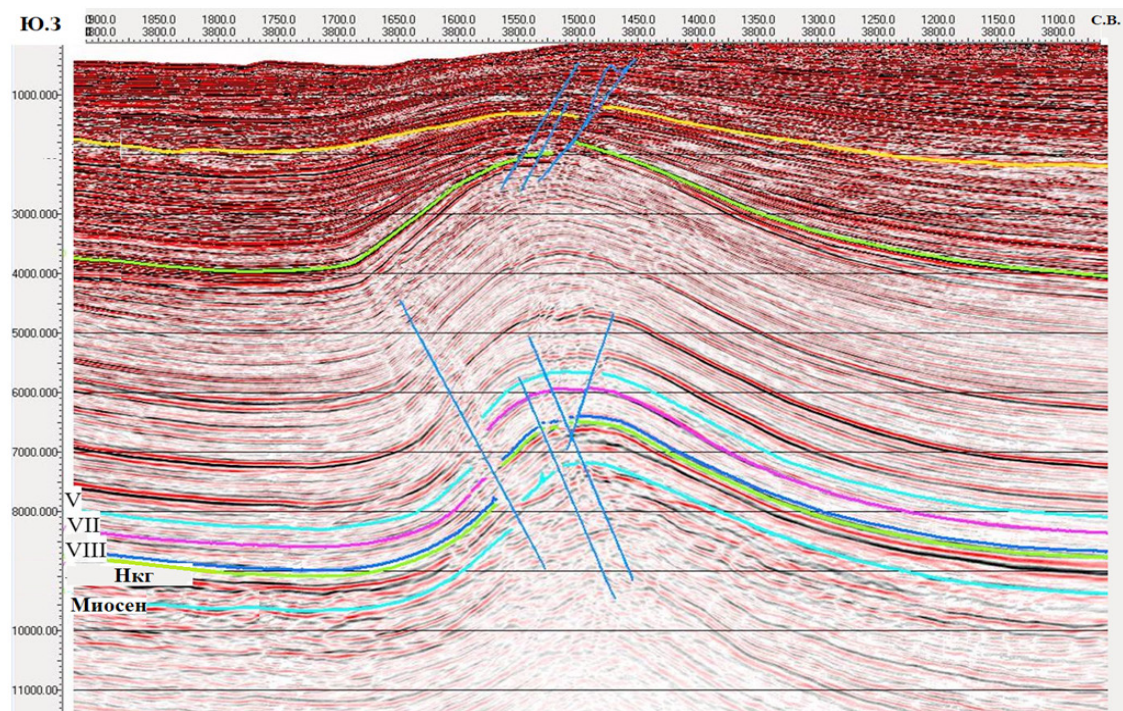


Рис. 6. Глубинный разрез месторождения Умид /
Fig. 6. Deep section of the Umid field

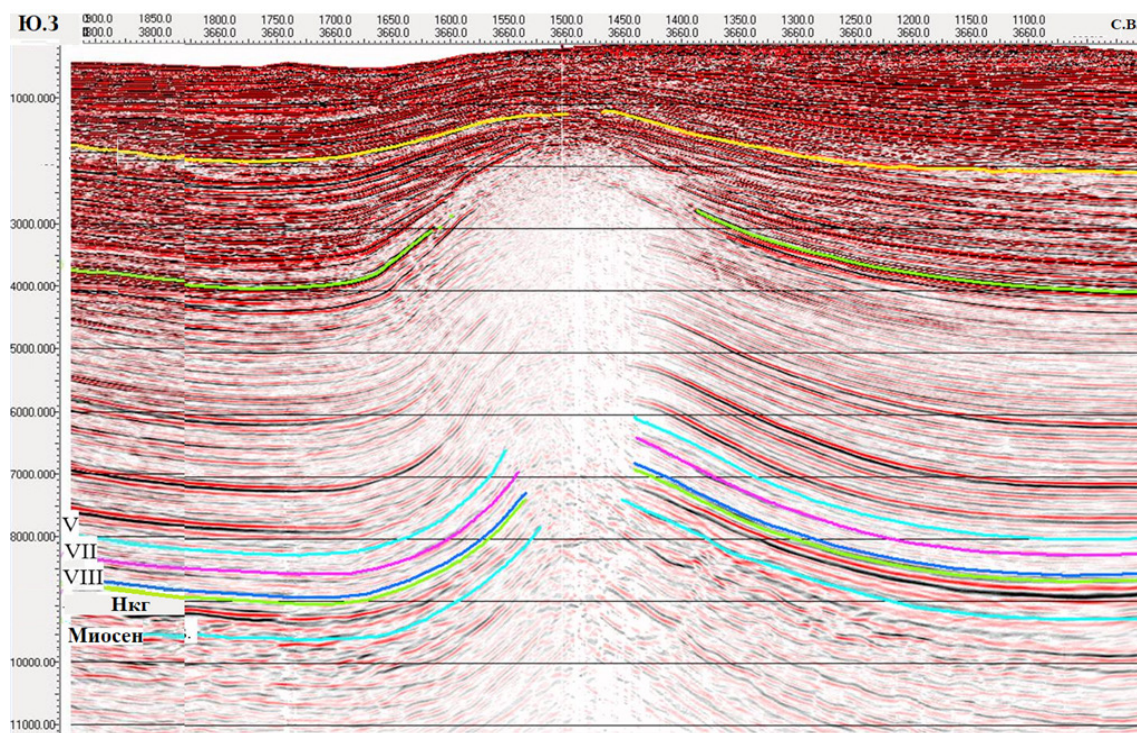


Рис. 7. Глубинный разрез месторождения Умид полученный на программе Crossline 3660 /
Fig. 7. Depth section of the Umid field obtained using the Crossline 3660 program

Структура Бабек условно завершается на изогипсе с отметкой 7750 м. Согласно этому, размеры замкнутой части конструкции составляют 15,5 x 2,7 км. Структура усложняется изломами различной амплитуды, разломами вдоль оси удлинения. В результате дизъюнктивной дислокации арочная часть сооружения разделена на раз-

битые блоки, сдвинутые на юг относительно друг друга. Северо-восточное крыло сооружения, которое имеет более простую конструкцию, погружается до глубины 9250 м на севере и присоединяется к синклине Кичикдаг-Умид. Самая глубокая часть синклинали завершается на изогипсе с отметкой 10000 м.

Результаты сейсмических данных подтверждают, что эти структуры имеют благоприятную тектоническую структуру в глубоких слоях и пригодны для образования месторождений углеводородов.

Выводы

Формирование Каспийского бассейна было проанализировано со ссылкой на модель «мантийного плюма» с учетом геофизических данных, и предполагалось, что в формировании современной морфоструктуры бассейна играли роль кольцевые геодинамические процессы, происходящие в мантии.

Геодинамическое напряжение, накопленное в результате горизонтальных, вертикальных и круговых движений, создаваемых плюмом в мантии, повлияло на динамику осадочного слоя до глубины 25 км, границы Конрада 20-32 км 40-53 км, и границы Мохо до глубины 40-53 км, где постоянно менялась морфоструктура осадочного слоя. Горизонтальное движение каждого из этих слоев было различным, и землетрясения наблюдающиеся и по сей день, происходили в соответствии с их динамикой.

Геодинамическое напряжение в осадочном чехле наблюдается по горизонтальному смещению в слоистую форму внутри осадочного комплекса. По нашему мнению, с помощью GPS-исследований очень трудно различить горизонтальные движения, которые по-разному наблюдаются на глубине в отдельных комплексах.

На карте эпицентров землетрясений на территории Азербайджана и в глубине гипоцентров в указанных интервалах наблюдаются соответствующие изменения сейсмической активности в форме круга. Сильные землетрясения с относительной магнитудой $M \geq 6-8$ происходят в диапазоне глубин 7-20 км. В северной дуге Южного Каспия, где активность плюма все еще присутствует в интервале 55-65 км в базальтовом слое, в этом интервале наблюдаются признаки деформации в соответствии с характерными очагами землетрясения.

Совершенствование современной геодинамической модели с учетом палеогеоморфологических условий Каспийского бассейна, сеймотектонических особенностей и проведение исследований в соответствии с этой моделью для лучшего руководства поиском структур нефти и газа в более глубоких слоях в будущем могут дать более эффективные результаты.

Умид, Бабек, Шах Дениз и др. структуры Южно-Каспийского бассейна, находятся в районе источника плюма, который все еще активен. Предполагается, что существуют благоприятные условия для образования углеводородов в более глубоких слоях ниже ПТ. Нефтегазовый потенциал вновь пробуренных скважин подтверждает это. На примере структуры Умида коллекторские характеристики отложений под ПТ, тектоническая структура ПТ на разных горизонтах, стратиграфическо-литологические особенности и сейсмогеодинамические условия считаются очень благоприятными для формирования месторождений нефти и газа.

Петрофизические и литологические данные по скважинам, пробуренным в глубоких слоях структуры Умид, а также в районах Шах-Дениз, Булла-Дениз и Алят-Дениз, дают основание утверждать, что в глубоких слоях имеются богатые месторождения нефти и газа.

Литература

1. Астафьев Д. А., Медведев Н. Ф., Ахияров А. В., Толстиков А. В., Гереш М. П., Толстикова Т. А. Тектоно-динамические и литолого-фациальные предпосылки нефтегазоносности Южно-Каспийской впадины. // В сб. научных трудов «Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.». – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. – С. 84-93.
2. Грачев А. Ф. Мантийные плюмы и геодинамика. – М.: Недра, 1996. – 196 с.
3. Гарагаш И. А., Дубовская А. В. Глубинное и разломноблоковое строение земной коры в геомеханической модели напряженно-деформированного состояния Каспийского региона. // Пятые научные чтения памяти Ю. П. Булашевича. – М.: ИФЗ РАН, 2009. – С. 88-92.
4. Етирмишли Г. Д., Велиев Г. О., Казымова С. Э., Исмаилова С. С., Казымов И. Э. Технологии добычи остаточной нефти. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – № 1 (9). – С. 84-96.
5. Зоненшайн Л. П., Городницкий Л. М. Палеоокеаны и движение континентов. // Природа. – 1976. – № 11. – С. 74-84.
6. Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И. Внутриплитовый вулканизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли. // Геотектоника. – 1983. – № 1. – С. 28-45.
7. Зоненшайн Л. Р., Кузьмин М. И., Натапов Л. М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 1. – М.: Недра, 1990а. – 326 с.
8. Зоненшайн Л. Р., Кузьмин М. И., Натапов Л. М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 2. – М.: Недра, 1990б. – 334 с.
9. Казымова С. Э., Казымов И. Э. Современная геодинамика среднего и южного Каспия. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 2. – С. 140-152.
10. Керимов К. М., Новрузов А. К. Кольцевые структуры Южно-Каспийской мегавпадины и некоторые особенности их нефтегазоносности. // Вестник Бакинского университета. – 2012. – № 4. – С. 18-25.
11. Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В. Тектоника плит и мантийные плюмы – основа эндогенной тектонической активности земли последние 2 млрд. лет. Тектоника и геодинамика. // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. № 1. – С. 11-30.
12. Леонтьев О. К., Маев Е. Г., Рычагов Г. И. Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. – М.: Изд-во МГУ, 1977. – 210 с.
13. Мамиевенов Н., Филин А. С. Геолого-геотермическая эволюция рифтогенных зон восточных районов Южно-Каспийской впадины. // Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. – 2012. – № 1 (9). – С. 195.
14. Сеначин В. Н., Баранов А. А. Гравитационные аномалии коры и верхней мантии центральной и южной Азии. // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7. № 4. – С. 513-528.
15. Хаин В. Е. Основные проблемы современной геологии. – М.: Научный мир, 2003. – 348 с.
16. Хаин В. Е. Проблема происхождения и возраста Южно-Каспийской впадины и ее возможные решения. // Геотектоника. – 2005а. – № 1. – С. 40-44.
17. Хаин В. Е. Современная геология: Проблемы и перспективы. // Соросовский образовательный журнал. – 2005б. – № 1. – С. 66-73.
18. Хаин В. Е. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли. // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. № 6. – С. 753-760.
19. Allen M., Jackson J., Walker R. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. // Tectonics. – 2004. – 23 p.
20. Kazimova S. E., Ismailova S. S., Bakirov M. A. Geographical and geodynamic features of the Caspian Sea and seismogeotectonics of the Azerbaijani sector. // Azerbaijan oil industry Journal. – 2020. – No. 4. – pp. 9-14.

21. Maruyama Sh. Plume tektonice. // Geol. Soc. Japan. – 1994. – No. 1. – pp. 24-49.
22. Richards M.A., Alvarez W., Self S., Karlstrom L., Renne P.R., Manga M., Sprain C.J., Smit, J. Vanderkluyzen L., Gibson S.A. Triggering of the largest Deccan eruptions by the Chicxulub impact. // Geol. Soc. Am. Bull. – 2015. – Vol. 127. – pp. 1507-1520.
23. Veliyev H.O. Geodynamic model, seismic activity of the south Caspian basin and perspective direction of oil and gas fields exploration. // Seismoprognoz, Observ. Territ. Azerb. – 2016. – Vol. 13. No. 1. – pp. 32-37.

References

1. Astaf'ev D. A., Medvedev N.F., Akhiyarov A.V., Tolstikov A.V., Geresh M.P., Tolstikova T.A. Tectono-dynamic and lithofacies prerequisites for the oil and gas potential of the South Caspian depression. In: Proceedings "Problems of resource provision for gas-producing regions of Russia until 2030". Moscow. Gazprom VNIIGAZ, 2010. pp. 84-93. (In Russ.)
2. Grachev A.F. Mantle plumes and geodynamics. Moscow. Nedra, 1996. 196 p. (In Russ.)
3. Garagash I.A., Dubovskaya A.V. Deep and fault-block structure of the earth's crust in the geomechanical model of the stress-strain state of the Caspian region. In: Proceedings of Fifth scientific readings in memory of Yu.P. Bulashevich. Moscow, IPE RAS, 2009. pp. 88-92. (In Russ.)
4. Yetirmishli G.D., Valiyev H.O., Kazimova S.E., Ismailova S.S., Kazimov I.E. Residual oil recovery technologies. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. No. 1 (9). pp. 84-96. (In Russ.)
5. Zonenshain L.P., Gorodnitsky L.M. Paleo-oceans and continental movement. Priroda. 1976. No. 11. pp. 74-84. (In Russ.)
6. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I. Intraplate volcanism and its significance for understanding the processes in the Earth's mantle. Geotectonics. 1983. No. 1. pp. 28-45. (In Russ.)
7. Zonenshain L.R., Kuzmin M.I., Natapov L.M. Plate tectonics of the USSR territory. Book 1. Moscow. Nedra, 1990a. 326 p.; (In Russ.)
8. Zonenshain L.R., Kuzmin M.I., Natapov L.M. Plate tectonics of the USSR territory. Book 2. Moscow. Nedra, 1990b. 334 p. (In Russ.)
9. Kazimova S.E., Kazimov I.E. The modern geodynamics of the middle and southern part of Caspian sea. Geology and Geophysics of Russian South. 2016. No. 2. pp. 140-152. (In Russ.)
10. Kerimov K.M., Novruzov A.K. Ring structures of the South Caspian megadepression and some features of their oil and gas potential. Bulletin of Baku University. 2012. No. 4. pp. 18-25. (In Russ.)
11. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Plate tectonics and mantle plumes – the basis of endogenous tectonic activity of the earth for the last 2 billion years. Tectonics and Geodynamics. Geology and Geophysics. 2016. Vol. 57. No. 1. pp. 11-30. (In Russ.)
12. Leont'ev O. K., Maev E. G., Rychagov G.I. Geomorphology of the shores and bottom of the Caspian Sea. Moscow. Moscow State University, 1977. 210 p. (In Russ.)
13. Mamiesenov N., Filin A.S. Geological and geothermal evolution of riftogenic zones in the eastern regions of the South Caspian depression. Problems of resource provision for gas producing regions of Russia until 2030. 2012. No. 1 (9). pp. 195. (In Russ.)
14. Senachin V.N., Baranov A.A. Gravity anomalies of the crust and upper mantle of central and southern Asia. Geodynamics and Tectonophysics. 2016. Vol. 7. No. 4. pp. 513-528. (In Russ.)
15. Khain V.E. The main problems of modern geology. Moscow. Nauchnyi mir, 2003. 348 p. (In Russ.)
16. Khain V.E. The problem of the origin and age of the South Caspian depression and its possible solutions. Geotectonics. 2005a. No. 1. pp. 40-44. (In Russ.)
17. Khain V.E. Modern Geology: Problems and Prospects. Soros educational journal. 2005b. No. 1. pp. 66-73. (In Russ.)

18. Khain V. E. On the basic principles of building a truly global model of the dynamics of the Earth. *Geology and Geophysics*. 2010. Vol. 51. No. 6. pp. 753-760. (In Russ.)
19. Allen M., Jackson J., Walker R. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*. 2004. 23 p.
20. Kazimova S. E., Ismailova S. S., Bakirov M. A. Geographical and geodynamic features of the Caspian Sea and seismogeotectonics of the Azerbaijani sector. *Azerbaijan oil industry Journal*. 2020. No. 4. pp. 9-14.
21. Maruyama Sh. Plume tektonice. *Geol. Soc. Japan*. 1994. No. 1. pp. 24-49.
22. Richards M. A., Alvarez W., Self S., Karlstrom L., Renne P. R., Manga M., Sprain C. J., Smit, J. Vanderkluysen L., Gibson S. A. Triggering of the largest Deccan eruptions by the Chicxulub impact. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2015. Vol. 127. pp. 1507-1520.
23. Veliyev H. O. Geodynamic model, seismic activity of the south Caspian basin and perspective direction of oil and gas fields exploration. *Seismoprognoz, Observ. Territ. Azerb.* 2016. Vol. 13. No. 1. pp. 32-37.

УДК 551.2.02

DOI: 10.46698/VNC. 2021.47.92.004

Original paper

Geodynamics of the territory of Azerbaijan on the basis of GPS data in 2017-2019 yy.

I. E. Kazimov 

National Academy of Sciences of Azerbaijan Republican Seismic Survey Center,
123 Guseyn Javid Str., Baku 1001, Azerbaijan, e-mail: ilya_24@mail. ru

Received: 02.04.2021, revised: 13.05.2021, accepted: 22.05.2021

Abstract: Relevance. the results obtained, in conjunction with these seismicity and the mechanisms of earthquakes, allow to determine the modern geodynamic situation of the studied region. **The aim** of the work was geodetic analysis and comparison of the results of GPS stations obtained for the period 2017-2019. on the territory of Azerbaijan. **Methods.** In the process of studying geodynamic processes using GPS technologies, two spatio-temporal modes are mainly used: a single redefinition of the initial coordinates of the points of geodetic networks and the displacement of the initial values of deformations. GPS data were processed using the GAMIT/GLOBK program. **Results.** One of the most pronounced features of the GPS velocity field is a decrease in the velocities of GPS stations (northern component of VN), perpendicular to the direction of expansion of the Greater Caucasus surface from south to north. The movement of the earth's surface to the north-north-east is interpreted as one of the reasons for this accumulation of stress. In addition, there is a tendency for horizontal movement in the Kura Depression and the Lesser Caucasus, which is reflected in the increase in velocity from west to east along the extension of the mountain range. It was determined that the earth's crust shortened at a velocity of ~ 5 mm / year in the Baku (Absheron peninsula). During 2019, on average, up to 8.4 mm per year in the north-northeast direction is observed for the territory of Azerbaijan. Separate velocities were also calculated for each station. Compared to 2018, it was determined that out of 24 GPS stations PQLG, XNQG, IMLG, QZXG, GANG, MNGG, FZLG, SATG, LKRG, LRKG and YRDG stations, the value of horizontal velocities increased by 0.5-7.0 mm/year, ZKTG, QBLG. At QSRG, ATGG, GDBG, AGDG, ALIG, JLVGG, GALG, GOBG and NDRG stations, the velocities values decreased by 0.5-3.1 mm/year. In 2019, the highest velocities were observed at Ganja, Mingachevir and Saatli stations. On average, velocities were 3.1-9.6 mm/year in the Greater Caucasus, 6.9-16.5 mm/year in the Kura Basin, 10.2-14.8 mm/year in the Talish area and on the Apsheron Peninsula. It varies between 3.6-4.8 mm/year.

Keywords: geodynamic model, GPS stations, collision zone in the Greater Caucasus, Zagros mountain.

For citation: Kazimov I. E. Geodynamics of the territory of Azerbaijan on the basis of GPS data in 2017-2019 yy. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii =Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.47.92.004.

DOI: 10.46698/VNC. 2021.47.92.004

Оригинальная статья

Геодинамика территории Азербайджана на основе данных GPS за 2017-2019 гг.

И. Э. Казымов 

Национальная Академия Наук Азербайджана, Республиканский Центр
Сейсмологической Службы, Республика Азербайджан, AZ1001, г. Баку,
ул. Г. Джавида, 123, e-mail: ilya_24@mail.ru

Статья поступила: 02.04.2021, доработана: 13.05.2021, принята к публикации: 22.05.2021

Резюме: Актуальность работы: полученные результаты в совокупности с приведенной сейсмичностью и механизмами землетрясений позволяют определить современную геодинамическую ситуацию изучаемого региона. **Целью работы** являлся геодезический анализ и сравнение результатов GPS-станций, полученных за период 2017-2019 гг. на территории Азербайджана. **Методы работы.** В процессе изучения геодинамических процессов с использованием GPS технологий в основном применяются два пространственно-временных режима: однократное переопределение начальных координат точек геодезических сетей и смещение начальных значений деформаций. Данные GPS обрабатывали с помощью программы GAMIT/GLOBK. **Результаты работы.** Одной из наиболее ярко выраженных особенностей поля скорости GPS является уменьшение скоростей станций GPS (северный компонент VN), перпендикулярных направлению расширения поверхности Большого Кавказа с юга на север. Движение земной поверхности на север-северо-восток интерпретируется как одна из причин такого накопления напряжения. Кроме того, существует тенденция горизонтального движения в Курской впадине и на Малом Кавказе, что отражается в увеличении скорости с запада на восток по продолжению горного хребта. Было установлено, что земная кора сокращалась со скоростью ~ 5 мм/год в Баку (Апшеронский полуостров). В течение 2019 года в среднем по территории Азербайджана наблюдается до 8,4 мм в год в северо-северо-восточном направлении. Отдельные скорости были также рассчитаны для каждой станции. По сравнению с 2018 годом было определено, что из 24 GPS станций PQLG, XNQG, IMLG, QZXG, GANG, MNGG, FZLG, SATG, LKRG, LRKG и YRDG, значение горизонтальных скоростей увеличилось на 0,5-7,0 мм/год, ZKTG, QBLG. На станциях QSRG, ATGG, GDBG, AGDG, ALIG, JLVGG, GALG, GOBG и NDRG значения скоростей снизились на 0,5-3,1 мм/год. В 2019 году самые высокие скорости наблюдались на станциях Гянджа, Мингячевир и Саатлы. В среднем скорости составляли 3,1-9,6 мм/год на Большом Кавказе, 6,9-16,5 мм/год в бассейне Куры, 10,2-14,8 мм/год в Талышском районе и на Апшеронском полуострове. Колебания находятся в пределах 3,6-4,8 мм/год.

Ключевые слова: геодинамическая модель, GPS-станции, зона коллизии на Большом Кавказе, гора Загрос.

Для цитирования: Казымов И. Е. Геодинамика территории Азербайджана на основе данных GPS за 2017-2019 гг. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.47.92.004.

Introduction

The most important element in creating a geodynamic model is to take into account the changes that occur under the influence of modern movements of the Earth's crust on the Earth's surface. They often determine the activity of many destructive natural phenomena and affect the course of exogenous, as well as processes that occur as a result of human economic activity. The prediction of unfavorable geodynamic processes requires not only knowledge of the occurrence of the processes themselves, concentrated

in adequate models, but also, of course, the initial state of the rock massifs, based on the collection of experimental data [Robertson, Mountrakis, 1996; Tapponnier et al., 2001; Milyukov et al., 2015; Pevnev, 2020, 2021].

One of the most widespread methods in the world today is the method based on global navigation satellite system (GNSS) technology. With the advent of GPS technologies, the first of the implemented GNSS technologies, it became possible to carry out high-precision (3-10 mm in all sizes) geodetic monitoring in relatively large areas of the site with relatively little money and time.

Modern movements on the Earth's surface reflect tectonic processes within the Earth's crust. However, the accuracy of determining the vertical velocity component through GPS observations is many times less than the accuracy of determining the horizontal velocity components. The deformation of the earth's crust can be considered continuous (continuous) and can be considered as a change in the shape and volume of an object. Thus, it is possible to determine the strain tensor at any given point on the earth's crust and on its surface for a given time [Jackson, McKenzie, 1984].

For the first time in the territory of Azerbaijan, the GPS tracking system was established in 1998 jointly with the Institute of Geology and Geophysics of ANAS and the Massachusetts Institute of Technology. Thus, the basis for the study of modern geodynamics of the territory of Azerbaijan on the basis of GPS technology was laid.

The velocity range obtained from GPS observations over the last 20 years clearly describes the movement of the earth's crust in the north-northeast direction at a velocity of 18-25 mm/year relative to Eurasia in the territories adjacent to Azerbaijan and the Lesser Caucasus. The African plate is moving north at a velocity of 10 mm/year and affects the geodynamics of the Zagros mountain structure [Aktug, 2013, Masson, 2007].

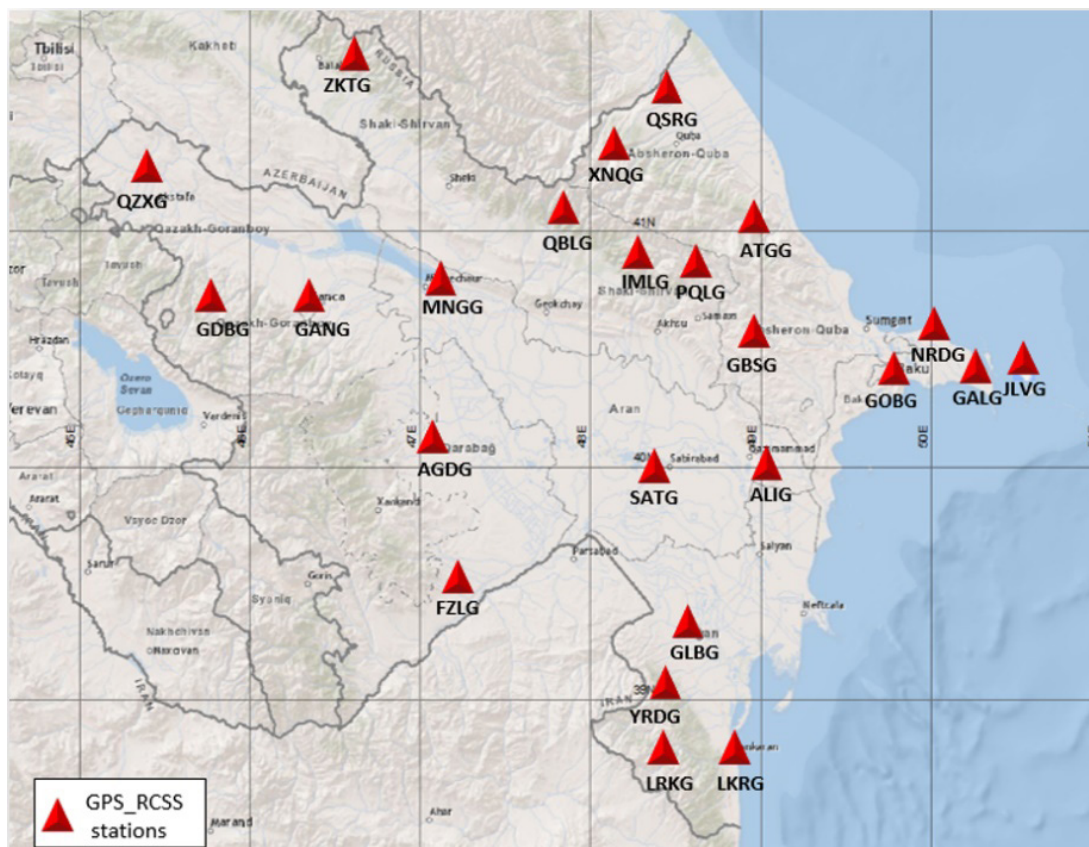
The purpose of our study was to calculate the modern rates of horizontal displacement of individual tectonic blocks within the country and to analyze the impact of strong earthquakes in 2017-2019.

Methods of studying of modern horizontal movements

In recent years, the Republican Seismological Survey Center (RSSC) uses the methods of satellite geodesy. The combination of traditional ground and satellite measurements allows you to successfully solve the assigned tasks. 24 GPS-receivers of the geodetic class of the company "Trimble" were used for the conduct of satellite geodetic measurements in the RSSC (Fig. 1) [Kazimov, Kazimova, 2019].

Almost all GPS stations (especially their U-components) present not only linear variations, but also significant non-linear variations in seasonal signals (defined as annual and semiannual variations), superimposed against approximately the strength of the band background. Linear variations can be well explained as the movement of the plate, while only a fraction of the nonlinear changes can be explained. In fact, nonlinear variations were mainly caused by unidentified internal errors associated with GPS technique and external unmodeled geophysical effects [Wright, 2004].

Moreover, it will become an obstacle to time series analysis and prevent the separation of unmodeled geophysical effects from nonlinear changes. As one of the main sources of GPS positioning errors, ionospheric delays play a very important role in data processing. Because it is difficult to accurately simulate ionospheric attenuation, virtually all GPS data processing programs always use a linear combination without an ionosphere (LC), including GAMIT, to avoid ionospheric delay effects [McClusky, 2000, 2003].



*Fig. 1. RSSC's network of GPS stations /
Рис. 1. Сеть GPS-станций ПЦС*

Thus, when studying geodynamic processes using GPS technologies, two spatio-temporal modes are mainly used: one-time redefinition of the initial coordinates of points of geodetic networks, and displacements of the reference values of deformations.

GPS data were processed using the GAMIT / GLOBK software [Herring, 2010; Kadirov, 2015] according to the procedure described in [Reilinger et al., 2006].

The refinements of the geodetic coordinates of the stations were processed on the server by the GPS processing service AUSPOS (version: AUSPOS 2.2)

The APSPOS Online GPS Processing Service uses International GNSS Products (IGS) (Finite, Fast, Ultrafast subject to availability) to compute accurate coordinates to ITRF anywhere on Earth and GDA94 in Australia. The service is designed to process only biphasic GPS phase data. When refining the coordinates of the GPS stations in this study, data from 14 closely spaced reference stations of the IGS network were added [Kazimov et al., 2017].

In addition, the parameters of the orbital-terrestrial orientation of all GPS stations and atmospheric zenith delays from the dual-frequency stations were calculated.

Processing of GPS data was carried out using the GAMIT / GLOBK (Kalman filter) 10.71 and TRACK software package, which form a complete set of programs for analyzing GPS measurements. The software was developed by Massachusetts Institute of Technology (MIT), Scripps Institute of Oceanography and Harvard University [Herring, 2003].

The data obtained as a result of experimental work on the current stress-strain state of the earth's crust and the patterns of its change in time, on the one hand, provide new fun-

damental knowledge about the nature of natural deformation processes occurring in the upper part of the earth's crust and the effect on the formation of the stress state [Conrad, Lithgow-Bertelloni, 2004; Thatcher, 2003].

Geodynamics of the territory of Azerbaijan in 2017-2019 on the basis of GPS data

Thus, in order to determine the velocities and directions of horizontal movements of individual tectonic blocks of the Earth's crust in the territory of Azerbaijan, the data obtained in 2017-2019 were analyzed. It was determined that 1.0-2 mm north-northwest movements are recorded in the Greater and Lesser Caucasus in 2017, and 1.5-2.5 mm northeast movements in the Middle and Lower Kura basin in 2017. Values for the GPS station located in the Deep Clock well increase to 3.5 mm. Hashchin The values of displacement at the station located on the island of Gilov in the Caspian Sea vary between 2-3 mm.

Based on the data obtained in 2017, on average, up to 10 mm of north-northeast movements are observed per year for the territory of Azerbaijan. Separate velocities were also calculated for each station. Compared to 2016, it was determined that out of 24 GPS stations, the values of horizontal velocities at QSRG, PQLG and ALIG stations increased by 1-2 mm/y. Velocity values have dropped at the remaining 21 stations. At stations located on the Absheron Peninsula, the velocity drops to 4-5 mm/y.

It was determined that QSRG, SATG, ALIG, LRKG and LRKG stations have the highest velocities in 2017. The map of epicenters for the last 10 months of 2017 shows that the most active regions are the Greater Caucasus, Saatli, Talish and the middle part of the Caspian Sea. The depth of each strong earthquake can indicate the depth of movement of any tectonic block. Thus, the epicenters of earthquakes in Zagatala, Sheki and Gabala regions in 2017 show the advantage of displacement movements in the direction of the left-lateral earthquake [Yetirmishli et al., 2017]. The depth of these earthquakes varies from 10 to 20 km. ZKTG, QZXG, GDBG and QBLG GPS stations located in this area show their values in the direction of 8.9 mm/y, 7.8 mm/y, 6.7 mm/y and 8.1 mm/y. At local time 07:24:19, 24 km from Saatli was registered the earthquake. It was felt in the epicenter with intensity about 5 points. The magnitude of the earthquake was 5.4 and the depth was 48 km. It can be considered that the earthquake was due to the movement of the block, which descended 48 km. Note that in 2017, the velocity values at the SATG GPS station reached 14.7 mm/y.

In 2018, it was determined that 1.0-2 mm north-northwest movements are recorded in the Greater and Lesser Caucasus in 2018, and 1.5-2.5 mm northeast in the Middle and Lower Kura basin. actions are recorded. At the GPS station located in the Deep Saatli well, the velocity of horizontal displacement during the year was determined to be 9.6 mm / year. Also, the values of displacement at the station located on the island of Gilov in the Caspian Sea were set at 5.7 mm. Based on the data obtained in 2018, up to 8 mm of north-northeast movements are observed in the territory of Azerbaijan on average per year. Separate velocities were also calculated for each station. Compared to 2017, it was determined that out of 24 GPS stations, JLVGG, GALG, GOBG and NDRG stations increased the values of horizontal velocities by 1-1.7 mm/y. Velocity values have dropped at the remaining 20 stations.

In order to reveal the relationship of horizontal movements with the geodynamic conditions of values, a comparison was made with a map of the epicenters of strong (ml>

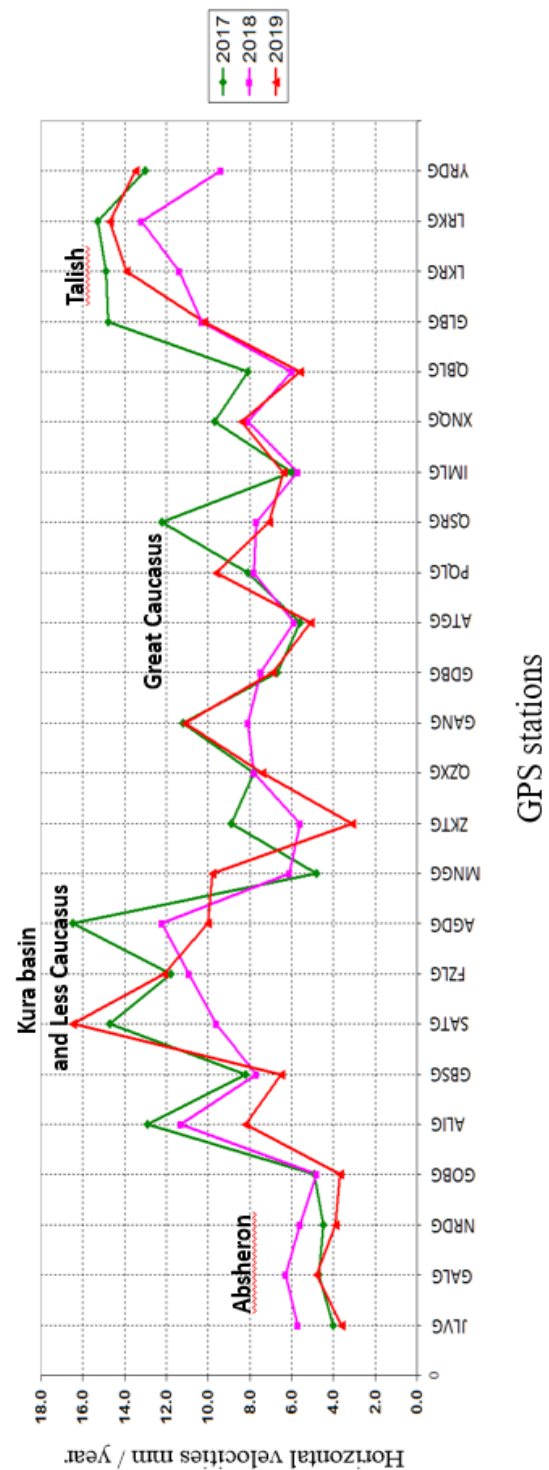
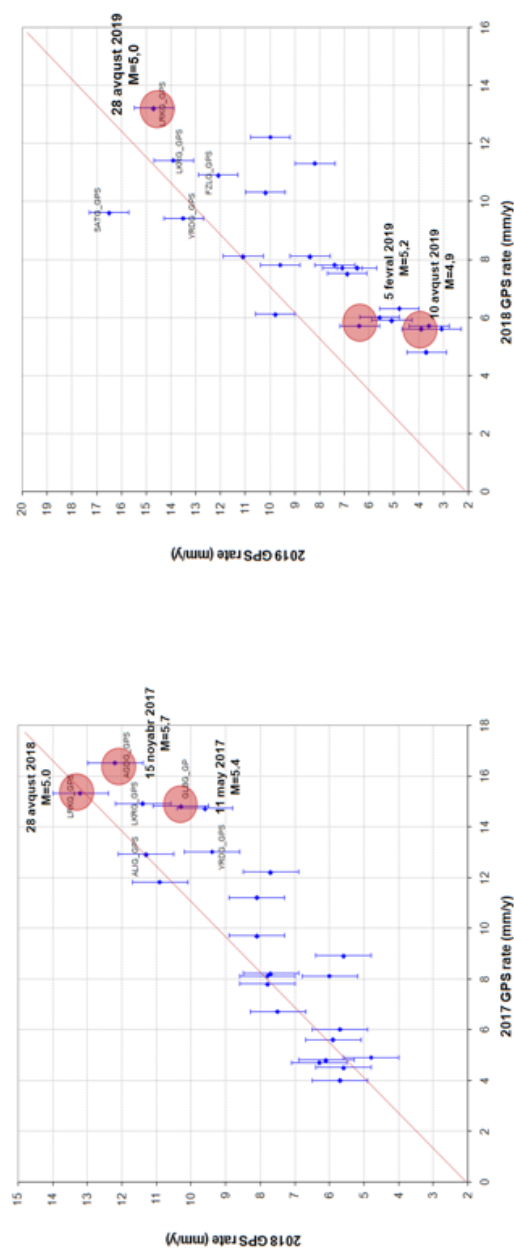


Fig. 2. Graphs of the dependence of strong earthquakes that occurred in 2017-2019 with the value of the velocities of horizontal movements obtained at the GPS stations / Рис. 2. Графики зависимости сильных землетрясений, произошедших в 2017-2019 гг. от значений скоростей горизонтальных движений, полученных на станциях GPS

3.0) earthquakes that occurred in 2018 (Fig. 2). It was found that in 2017, ZKTG, QSRG, SATG, ALIG, LRKG and LRKG stations had the highest velocities, and the most active regions were the Greater Caucasus, Saatli, Talish and the middle part of the Caspian Sea. LRKG, LRKG, GLBG, ALIG, FZLG and AGDG stations have been assigned the highest velocities in 2018. In 2018, the highest magnitude ($m_l > 5.0$) earthquakes occurred in Zagatala and Lerik regions. Taking this into account, it can be said that the most seismically active regions in 2017-2018 were the Greater Caucasus, Saatli and Talish regions. The Zagatala earthquake which occurred at 22:40:27 by local time, 16 km south of Zagatala station ($m_l = 5.5$) and Talish earthquake which occurred at 16:57:14 by local time at 13 km west of Lankaran station was felt at the epicenter up to 6 points. Note that in 2018, the velocity values at the LRKG GPS station reached 13.2 mm/y. (fig. 2). The GAMIT program for 24 GPS stations purchased in 2018 shows a diagram of the velocities and azimuth angles of horizontal displacements. As can be seen from the figure, the velocities at all stations vary between 1-14 mm/year, and the azimuth angles vary between 11-140 degrees.

In 2019, 1.5-3 mm north-northwest movements are recorded in the Greater and Lesser Caucasus, and 1.5-2.5 mm north-east movements are recorded in the Middle and Lower Kura basin (Fig. 3, 4). Also, the values of displacement at the station located on the island of Gilov in the Caspian Sea were set at 5.7 mm.

Separate velocities were also calculated for each station. Compared to 2018, it was determined that from 24 GPS stations, PQLG, XNQG, IMLG, QZXG, GANG, MNGG,

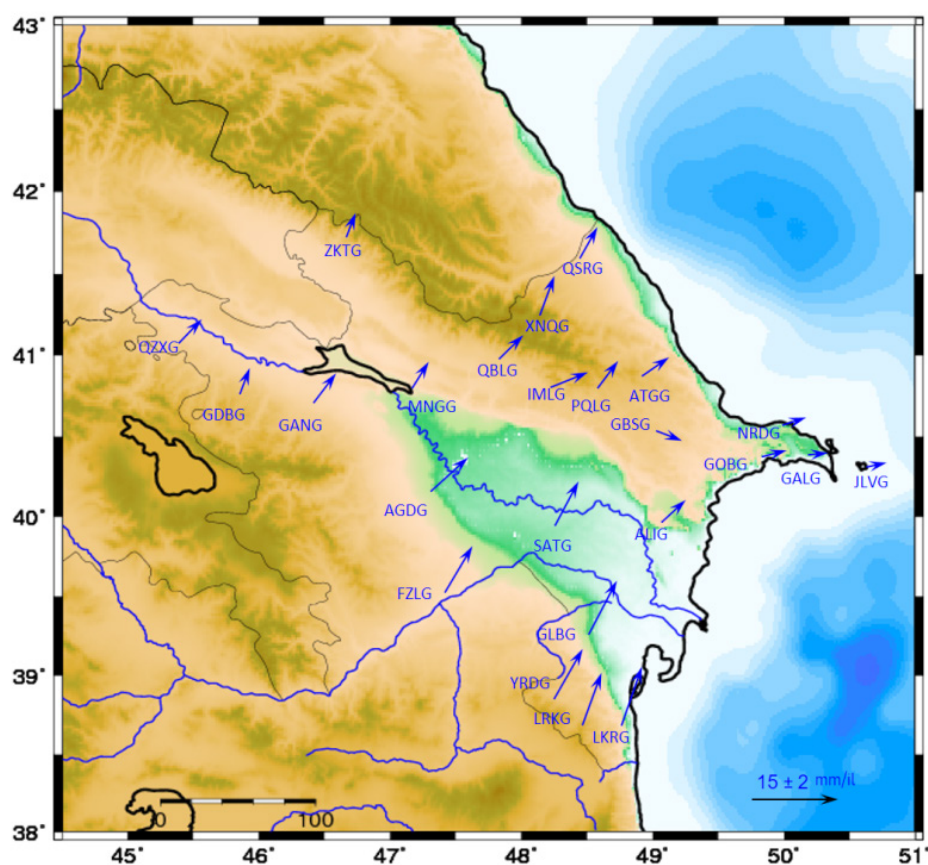


Fig. 3. Vectors map of horizontal movements according to GPS stations for 2017-2019 yy /
Рис. 3. Векторная карта горизонтальных перемещений по станциям GPS за 2017-2019 гг.

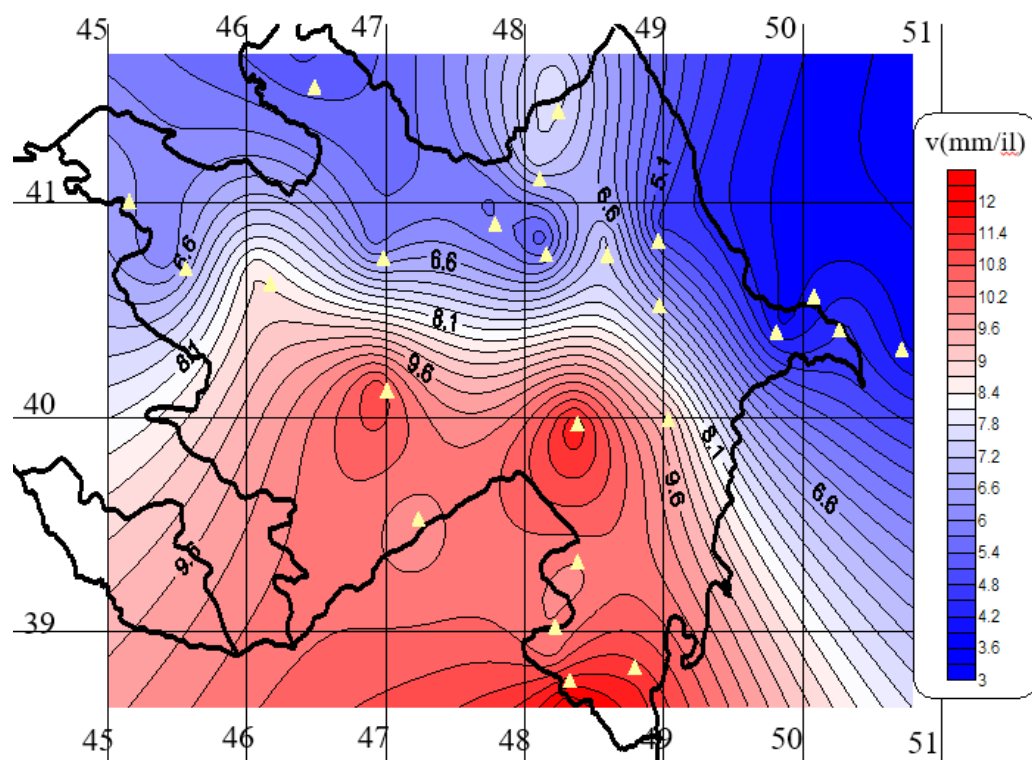


Fig. 4. Map of the distribution of horizontal movement velocities according to GPS station data for the 2017-2019 /

Рис. 4. Карта распределения скоростей горизонтального движения по данным GPS-станций за 2017-2019 гг.

FZLG, SATG, LKRG, LRKG and YRDG stations, the values of horizontal velocities increased by 0.5-7.0 mm/year, ZKTG, QBLG At QSRG, ATGG, GDBG, AGDG, ALIG, JLVGG, GALG, GOBG and NDRG stations, the velocity values decreased by 0.5-3.1 mm/year. In 2019, the highest velocities were observed at Ganja, Mingachevir and Saatli stations. On average, velocities were 3.1-9.6 mm/year in the Greater Caucasus, 6.9-16.5 mm/year in the Kura Basin, 10.2-14.8 mm/year in the Talish area and on the Apsheron Peninsula. It varies between 3.6-4.8 mm / year. Thus, on the basis of data obtained in 2019, an average of 8.4 mm/year north-east movements are observed for the territory of Azerbaijan.

In 2019, the earthquakes with the highest magnitude ($m_l \geq 5.0$) occurred in Zagatala ($m_l=4.9$) and Ismailli ($m_l=5.2$) regions. In addition, it should be noted that in 2019, high seismicity was detected in the Lesser Caucasus, Talish zone and the Caspian Sea.

In order to monitor the change of velocities depending on the different regions, two profiles were constructed, 1-1 and 2-2 in the direction of SW-NE (Fig. 5). The 1-1 profile is based on 11 stations. As in previous years, the values of velocities in the Lesser Caucasus and the Kura Basin vary from 10 to 16 mm / year, and in the Greater Caucasus from 6 to 9 mm/year. Profile 2-2 is set up at 10 stations, and as can be seen in the figure, the Talish zone is characterized by the highest velocities, but when crossing the territory of Apsheron, the velocities drop almost 3 times. The analysis of the azimuth angles of these stations showed that the directions of the stations located in the Talish region are directed to the EMS, while the values of the azimuth angles of the Apsheron stations increase from 40° to 80° Tal- 120° in the Talish zone and in the east-southeast direction. Based on

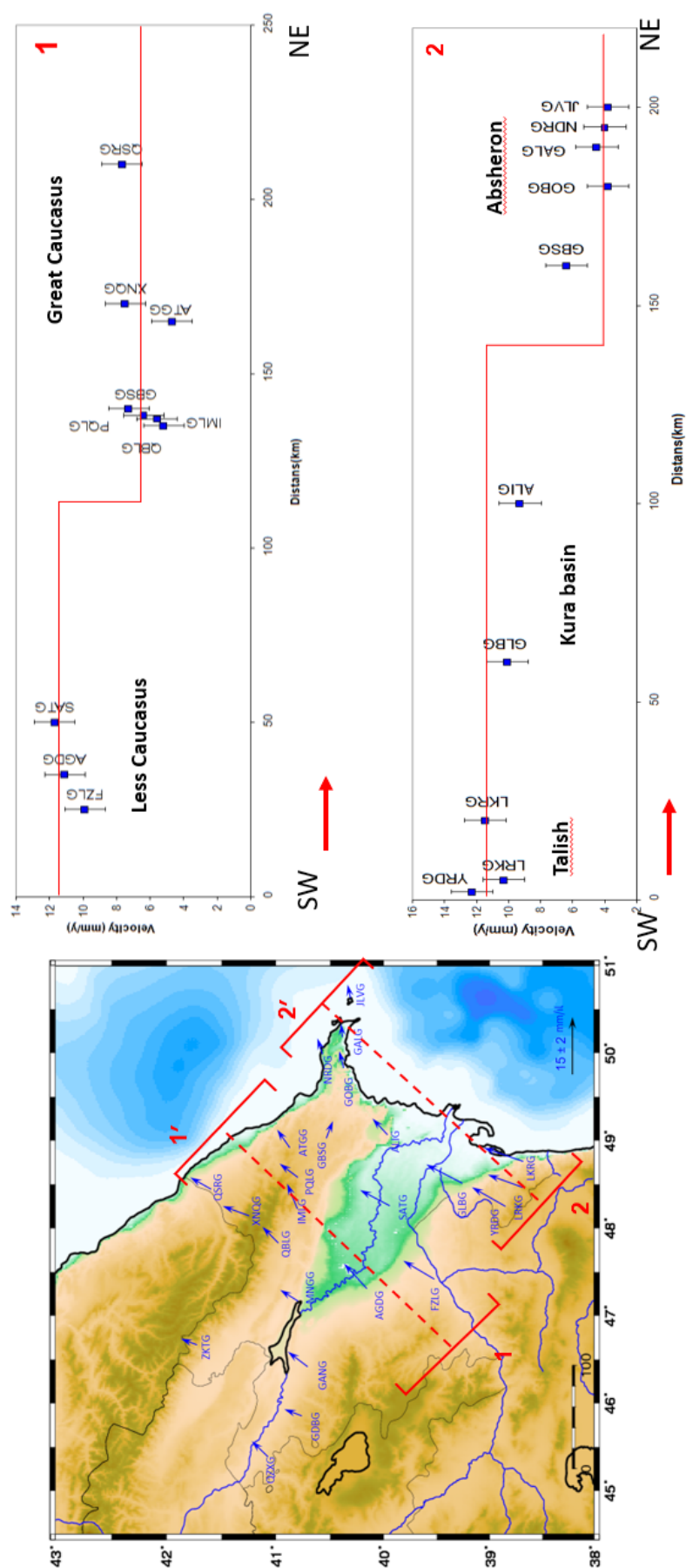


Fig. 5. Map of vectors of horizontal movements and two profiles in the direction SW-NE /
 Рис. 5. Карта векторов горизонтальных перемещений и два профиля в направлении ЮЗ-СВ

this, it can be said that under the influence of the northern drift of the Arab-Iranian plates [McKenzie, 1970, 1972, 1978; Mahmoud, 2005], the Lesser Caucasus and Talish regions move from south to north-east as a single plate with horizontal movements and move clockwise in the Apsheron region at 3-5 mm/year.

It should be noted that as a result of the analysis of data obtained from the Institute of Geology and Geophysics and the RSSC during 1998-2019, a new map of the distribution of horizontal crustal movements for Azerbaijan and neighboring areas was compiled. The compiled GPS velocity map (horizontal movements of the Earth's crust), the database of the results of their processing and analysis are attached to the regional archive and can be used for applied research in the territory of the Republic of Azerbaijan, including engineering seismology.

Results

Modern geodynamic conditions of the territory of Azerbaijan for 2017-2019yy were analyzed on the basis of space geodesy GPS and seismological data. One of the most pronounced features of the GPS velocity field is the reduction in the cost of GPS velocity components (northern component VN) perpendicular to the direction of extension of the Greater Caucasus Surface from south to north. The north-northeast movement of the earth's surface is interpreted as one of the reasons for this accumulation of tension. In addition, there is a tendency for horizontal movement in the Kura Depression and the Lesser Caucasus, which is reflected in the increase in velocity from west to east along the extension of the mountain range. It was determined that the earth's crust shortened at a velocity of ~ 5 mm/year at the Absheron peninsula. The quakes affected Zagatala, Sheki, Ismaili and Shamakhi regions along the southern slope of the Greater Caucasus. In this zone, there is a change in both the direction and value of GPS velocity vectors, which can be explained as the main reason for the accumulation of voltage.

Thus, on the basis of data obtained in 2018, on average, up to 8 mm per year in the north-northeast direction was observed for the territory of Azerbaijan. Separate velocities were also calculated for each station. Compared to 2017, it was determined that out of 24 GPS stations, JLVGG, GALG, GOBG and NDRG stations increased the values of horizontal velocities by 1-1.7 mm/y. Velocity values have dropped at the remaining 20 stations.

Analysis of velocities and azimuth angles of horizontal displacements obtained in the GAMIT program for 24 GPS stations acquired in 2018 showed that the velocities at all stations vary between 1-14 mm / year and azimuth angles between 11-140 degrees, and the most seismically active region is the Talish region. has been published.

In the direction of the Lesser Caucasus Lower Kura Basin (SMG-CS), an increase of up to 6 mm / year is observed. The values of azimuth angles of Apsheron stations increase from 40 to 120-140 and are directed in the east-southeast direction.

During 2019, on average, up to 8.4 mm per year in the north-northeast direction is observed for the territory of Azerbaijan. Separate velocities were also calculated for each station. Compared to 2018, it was determined that out of 24 GPS stations PQLG, XNQG, IMLG, QZXG, GANG, MNGG, FZLG, SATG, LKRG, LRKG and YRDG stations, the value of horizontal velocities increased by 0.5-7.0 mm/year, ZKTG, QBLG. At QSRG, ATGG, GDBG, AGDG, ALIG, JLVGG, GALG, GOBG and NDRG stations, the velocities values decreased by 0.5-3.1 mm/year. In 2019, the highest velocities were observed at Ganja, Mingachevir and Saatli stations. On average, velocities were 3.1-9.6 mm/year

in the Greater Caucasus, 6.9-16.5 mm/year in the Kura Basin, 10.2-14.8 mm/year in the Talish area and on the Apsheron Peninsula. It varies between 3.6-4.8 mm/year.

The analysis of the Talish zone showed that the directions of the stations located in the region are moving towards the EMS, while the values of the azimuth angles of the Apsheron stations increase from 40 to 80-120 and are directed in the east-southeast direction.

Referenses

1. Aktug B., Parmaksız E., Kurt M., Lenk O., Kılıçoglu A., Gurdal M.A., Ozdemir S. Deformation of Central Anatolia: GPS implications. *J. Geodyn.*, 2013. Vol. 67. pp. 78-96.
2. Conrad C.P., Lithgow-Bertelloni C. The temporal evolution of plate driving forces: Importance of "slab suction" versus "slab pull" during the Cenozoic. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. Is. B10407.
3. Herring T.A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.1 Internal Memorandum, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003. Vol. 20.
4. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2010. 48 p.
5. Jackson J., McKenzie D. Active tectonics of the Alpine – Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1984. Vol. 77. pp. 185-264.
6. Kadyrov F.A., Mamedov S.K., Safarov R.T. The study of the current geodynamic situation and the danger of earthquakes deformation of the earth's crust in Azerbaijan using 5-year GPS data. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Obninsk, GS RAS, 2015. pp. 156-162. (In Russ.)
7. Kazimov I.E., Kazimova A.F. Modern geodynamics of Azerbaijan on the basis of GPS stations for 2017-2018. Seismoprognozis observations in the territory of Azerbaijan. 2019. Vol. 16. No. 1. pp. 35-42. (In Russ.)
8. Kazimov I.E., Rakhimli Z.S., Yuzbashieva S.S. General principles of processing satellite measurements of the network of GPS stations in Azerbaijan. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2017. No. 1. pp. 100-114. (In Russ.)
9. Mahmoud S., Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Tealeb A. GPS-evidence for northward motion of the Sinai Block: implications for E. Mediterranean tectonics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005. Vol. 238. pp. 217-224.
10. Masson F., Anvari M., Djamour Y., Walpersdorf A., Tavakoli F., Daignières M., Nankali H., Van Gorp S. Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophys. J. Int.*, 2007. Vol. 170. pp. 436-440.
11. McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2000. Vol. 105. pp. 5695-5719.
12. McClusky S., Reilinger R., Mahmoud S., Ben Sari D., Tealeb A. GPS-constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophys. J. Int.*, 2003. Vol. 155. pp. 126-138.
13. McKenzie D. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. Int.*, 1972. Vol. 30. pp. 109-185.
14. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophys. J. Int.*, 1978. Vol. 55. pp. 217-254.
15. McKenzie D.P. Plate tectonics of the Mediterranean region. *Nature*, 1970. Vol. 226. pp. 239-243.
16. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Stebllov G.M. Velocities of Recent Movements of the Northern Caucasus Estimated from GPS Observations. *Geotectonics.* 2015. No. 3. pp. 56-65.

17. Pevnev A. K. Through difficulties to the earthquake prediction. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10 (2). pp. 82-94. DOI: 10.46698/VNC. 2020.25.51.006. (in Russ.)
18. Pevnev A. K. Substantiation of the main concepts for the deformation model of the crustal earthquake source preparation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (1). pp. 104-120. DOI: 10.46698/VNC. 2021.53.34.009. (in Russ.)
19. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., AlAydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrova A., Filikov S. V., Gomez F., AlGhazzi R., Gebran Karam. GPS constraints on continental deformation in the AfricaArabiaEurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res.*, 2006. Vol. 111. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
20. Robertson A., Mountrakis D. Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 1996. Vol. 260. pp. 1-9.
21. Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001. Vol. 294. Is. 5547. pp. 1671-1677. DOI: 10.1126/science. 105978.
22. Thatcher W. GPS-constraints on the kinematics of continental deformation // *International Geology Review*, 2003. Vol. 45. pp. 191-212. DOI: 10.2747/00206814.45.3.191.30.
23. Wright T. J., Parsons B., England P. C., Fielding E. J. InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet. *Science*, 2004. Vol. 305. Is. 5681. pp. 236-239. DOI: 10.1126/science. 1096388.
24. Yetirmishli G. J., Veliyev H. O., Kazimov I. E., Kazimova S. E. Correlation between GPS observation outcomes and depth structure in studying horizontal movements. *Bulletin of the Orenburg Scientific Center URO RAN*, 2018. No. 4. 10 p. [Electronic resource] (URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2018-4/Articles/GDE-2018-4.pdf>) DOI: 10.24411/2304-9081-2019-14013

ГЕОФИЗИКА

УДК 504.55.054:622 (470.6)

DOI: 10.46698/VNC. 2021.57.57.005

Оригинальная статья

Геофизический мониторинг разработки напряженно-деформированных рудовмещающих массивов

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

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

Статья поступила: 20.03.2021, доработана: 20.04.2021, принята к публикации: 11.05.2021

Резюме: Актуальность работы. Рассмотрены актуальные вопросы рационализации природопользования, включающие в себя установление величины и закономерностей экологического риска технологических процессов, оценку процессов коммуникации техногенных продуктов и прогнозирование экологической зависимости биоты от горного производства при подземной разработке месторождений Садонского рудного узла. **Целью исследований** является определение форм взаимодействия природных и технических систем, определяющих параметры геомеханики участка земной коры в районе освоения недр путем исследования напряженно-деформированного состояния массивов для разработки приемлемых вариантов добычи металлических руд. **Методы исследования.** Приведены результаты моделирования состояния рудовмещающих массивов на оптически активных материалах. Предложен коэффициент надежности для оценки безопасности горных технологий по развитию критических напряжений и деформаций. **Результаты работы.** Установлена адекватная зависимость между характером силового воздействия на природные и искусственные массивы и их устойчивостью с корреляцией между напряженностью массива и сохранностью земной поверхности, как гаранта безопасности экосистем биосферы. Даны результаты моделирования напряженности массива методом конечных элементов, распределения давления по контуру выработки на крепь и исследования фильтрационной неоднородности руд. Обобщены результаты анализа ретро- и перспектив развития способов управления состоянием массивов при разработке месторождений. Сделан вывод о возможности обеспечения оптимального соотношения напряжений в элементах геомеханической системы геофизическими методами в рамках мониторинга состояния горного массива и подземных выработок. В совокупности рекомендации представляют собой программу выхода горных предприятий региона из затяжного кризиса и восстановления бывшего потенциала одного из флагманов цветной металлургии, реализация которой формирует экономический, экологический и социальный эффект в условиях депрессивного промышленного региона.

Ключевые слова: Подземная разработка, месторождение, Садонский рудный узел, геомеханика, моделирование, горная технология, напряжения и деформации, геофизические методы, мониторинг.

Для цитирования: Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В. Геофизический мониторинг разработки напряженно-деформированных рудовмещающих массивов. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (...): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.57.57.005.

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC. 2021.57.57.005

Original paper

Geophysical monitoring of the development of stress-deformed ore massives

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

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

Received: 20.03.2021, revised: 20.04.2021, accepted: 11.05.2021

Abstract: Relevance. Topical issues of rationalization of nature management are considered, including the establishment of the magnitude and regularities of the ecological risk of technological processes, the assessment of the communication processes of technogenic products and the prediction of the ecological dependence of biota on mining during the underground development of the deposits of the Sadonsky ore cluster. **The Aim** of the research is to comprehensively study the interaction of natural and technical systems that ensure the geomechanical balance of massifs in the area of subsoil development by systematic monitoring of the stress-strain state of the massifs using the methods of complex generalization, analysis of practical experience and scientific achievements in the field of underground ore mining in the massifs. Complex structure, theory and practice of destruction of solid media by means of continuum mechanics and mathematical statistics with the development of economically and environmentally acceptable options for the extraction of metal ores. **Methods.** The results of modeling the state of ore-bearing massifs on optically active materials are presented. A reliability factor is proposed for assessing the safety of mining technologies for the development of critical stresses and deformations. **Results.** An adequate relationship has been established between the nature of the force impact on natural and artificial massifs and their stability with the correlation between the strength of the massif and the safety of the earth's surface, as a guarantor of the safety of biosphere ecosystems. The results of modeling the tension of the massif by the finite element method, the distribution of pressure along the contour of the excavation on the support and the study of the filtration heterogeneity of ores crushed for leaching purposes according to the propagation velocity of stress waves are given. The results of the analysis of retro- and prospects for the development of methods for managing the state of rock mass in the development of fields are generalized. A conclusion is made about the possibility of ensuring the optimal stress ratio in the elements of the geomechanical system by geophysical methods within the framework of monitoring the state of the rock mass and underground workings. Taken together, the recommendations represent a program for the recovery of the region's mining enterprises from a protracted crisis and the restoration of the former potential of one of the flagships of non-ferrous metallurgy, the implementation of which creates an economic, environmental and social effect in a depressed industrial region.

Keywords: Underground mining, deposit, Sadonsky ore cluster, geomechanics, modeling, mining technology, stresses and deformations, geophysical methods, monitoring.

For citation: Golik V. I., Burdzieva O. G., Dzeranov B. V. Geophysical monitoring of the development of stress-deformed ore massives. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.57.57.005.

Введение

Горнодобывающая отрасль является лидером среди промышленных технологий путем нарушения сплошности земной коры создает условия для разрушения земной поверхности, изменения форм рельефа и качество флоры и фауны [Каурин и др., 2018; Burdzieva, 2016].

Проблема рационализации природопользования включает в себя установление величины и закономерностей экологического риска, оценку процессов коммуникации техногенных продуктов и прогнозирование экологической зависимости окружающей среды от агрессии горного производства [Дребенштедт и др., 2018; Ключев и др., 2020].

Повышенная опасность добычных процессов определяется синергетическим характером проявления, когда развитие отдельных процессов приводит к возникновению других процессов с большим суммарным эффектом, чем простая сумма эффектов.

Процессы освоения запасов обладают синергетическим характером проявления, когда развитие отдельных процессов генерирует нередко и неизвестные процессы с большим суммарным отрицательным эффектом, чем ожидаемая сумма эффектов.

На территории металлических рудников накоплены миллионы тонн хвостов, которые стали реактором химических процессов заражения окружающей среды регионов Северного Кавказа, Юга России и Каспия.

Горные работы сопровождаются образованием техногенных пустот, которые участвуют в перераспределении напряженно-деформированного состояния массивов.

Успех разработки месторождений полезных ископаемых определяется полнотой учета и интерпретации поведения природных и технических систем, участвующих в развитии напряженно-деформационного состояния природных и искусственных массивов в [Дребенштедт и др., 2018; Рыльникова и др., 2017].

Поэтому исследование механизма возникновения и перераспределения напряжений в массиве горных пород [Дребенштедт и др., 2018; Aksenov et al., 2019] с целью совершенствования технологий разработки напряженно-деформированных рудовмещающих массивов представляет собой крупную научно-производственную проблему.

Методы исследования

Моделирование состояния массива на оптически активных материалах. Моделирование напряженности массива методом конечных элементов. Характер и закономерности распределения горного давления на жесткую арочную крепь. Измерение напряжений в крепи с помощью датчиков давления. Определение границ зоны пластических деформаций и разрушение пород прозвучиванием массива в скважинах. Измерение фильтрационной неоднородности руд по скорости волн напряжений. Инженерное прогнозирование перспектив совершенствования технологий.

Результаты исследования

Основой безопасной разработки месторождений полезных ископаемых является профилактика критических напряжений на всех этапах существования.

Состояние массива моделировалось на оптически активных материалах в условиях Садонских массивов, в том числе:

- боковой распор 0,5, 1,0, 1,5;
- угол наклона силового вектора к вертикальной оси $\alpha = 0$;
- модуль закладки $E = 0,1$ МПа;
- модуль вмещающих пород – 1,4 МПа.

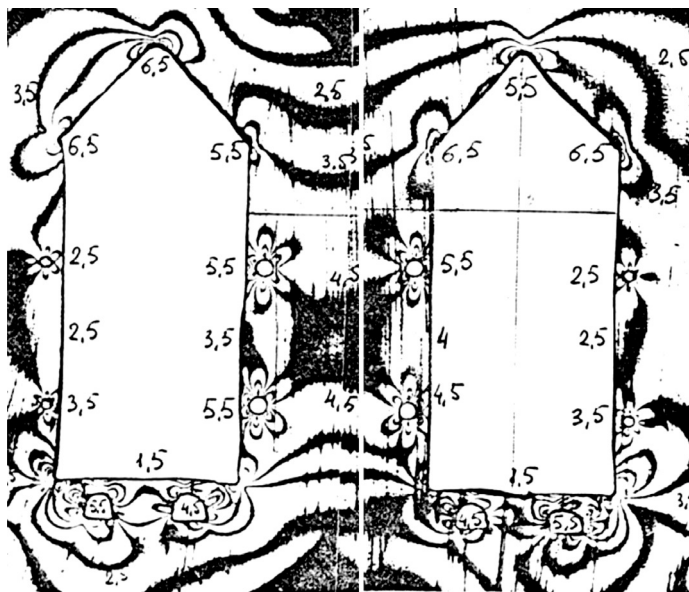


Рис. 1. Поля изохром при коэффициенте бокового распора 1,0: слева – открытая камера; справа – заложенная камера /

Fig. 1. Fields of isochrome with a coefficient of side thrust 1.0: on the left – an open chamber; on the right – a filled chamber

Определено, что наиболее напряжена потолочина камер. При вариантах без закладки в междукamerных целиках концентрация напряжений близка к критической (рис. 1).

При необходимости сохранения массивов и земной поверхности выработанное пространство закладывается твердеющими смесями.

Механизмом регулирования х геомеханических условий является применение технологий с заполнением пустот твердеющими смесями и хвостами подземного выщелачивания руд.

Степень безопасности горных технологий оценивается коэффициентом надежности K_1 :

$$K_1 = f(V_o - V_z K_T),$$

где V_o – объем образованных в массиве пустот, м^3 ;

V_z – объем заполненных пустот, м^3 ;

K_T – доля заполнителя, %.

Корреляция между уровнем напряжений в массивах и состоянием земной поверхности над ними устанавливается исследованиями с применением методов шахтной геофизики.

Полученные результаты систематических исследований свидетельствуют об адекватной зависимости между характером силового воздействия на природные и искусственные массивы и их устойчивостью. В обоих случаях наблюдается линейный рост напряжений с увеличением времени, причем в обоих случаях зависимость является линейной (рис. 2).

Такая корреляция в поведении рудовмещающих массивов имеет практическую значимость для обоснования возможности использования затвердевших кольматированных хвостов подземного блокового выщелачивания руд, как альтернативы экономически неприемлемых бетонных твердеющих смесей.

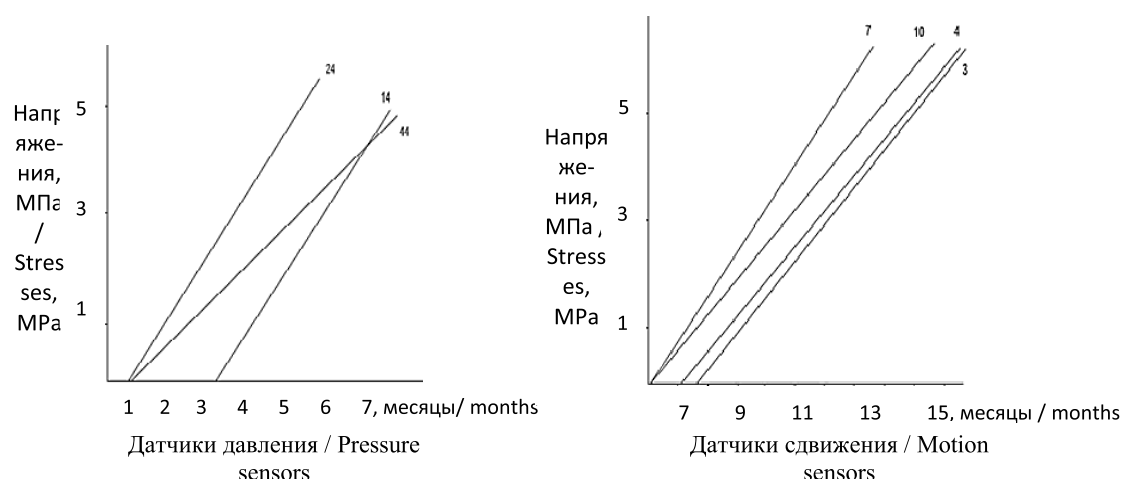


Рис. 2. Зависимость напряжений от времени /
Fig. 2. Dependence of the stress on time

Моделирование напряженности массива методом конечных элементов показывает, что на контуре выработок радиальные напряжения приближаются к 0, а тангенциальные – имеют максимальные значения.

Уменьшить время оценки напряженности породных кернов позволяет метод Голика-Денисова с нагружением образцов ступенями и полной разгрузкой на каждой ступени до появления остаточных деформаций. О напряженности массива судят по соотношению упругой и остаточной деформации.

Коэффициент удароопасности K :

$$K = (E_m - E_o) / E_o = E_y / E_o,$$

где E_y – упругая деформация, МПа;

E_o – остаточная деформация, МПа;

E_m – максимально достигнутая деформация, МПа;

Характер и закономерности распределения горного давления на жесткую металлическую арочную крепь устанавливают анализом показателей системы датчиков (рис. 3).

В прочных скальных породах в окрестностях горных выработок формируется зона пластических деформаций и разрушение пород, которая определяет поведение природных и искусственных массивов.

Излучатель акустических сигналов и звукоприемник помещали в скважинах глубиной 2,5 м, пробуренных на расстоянии 5 м друг от друга. Частота посылаемого в скважину сигнала составляла 2 кгц.

При прозвучивании породного массива размером 20x40 м, сложенного алевролитами с коэффициентом структурного ослабления 0,2, прочностью на сжатие 30-90 МПа, и на растяжение 3-3,5 МПа, сигнал перемещался со скоростью 3500 м/с.

При исследовании другого массива размерами 100x115 м в известняках с коэффициентом структурного ослабления 0,3, пределом прочности на сжатие – 150 МПа и на растяжение 8-9 МПа скорость перемещения сигнала изменялась от 4000 до 6100 м/с.

Объединение сравнимых значений коэффициента звукопоглощения изолиниями графически позволяет определить местоположение звукопоглощающего объекта на исследуемом участке месторождения (рис. 4)

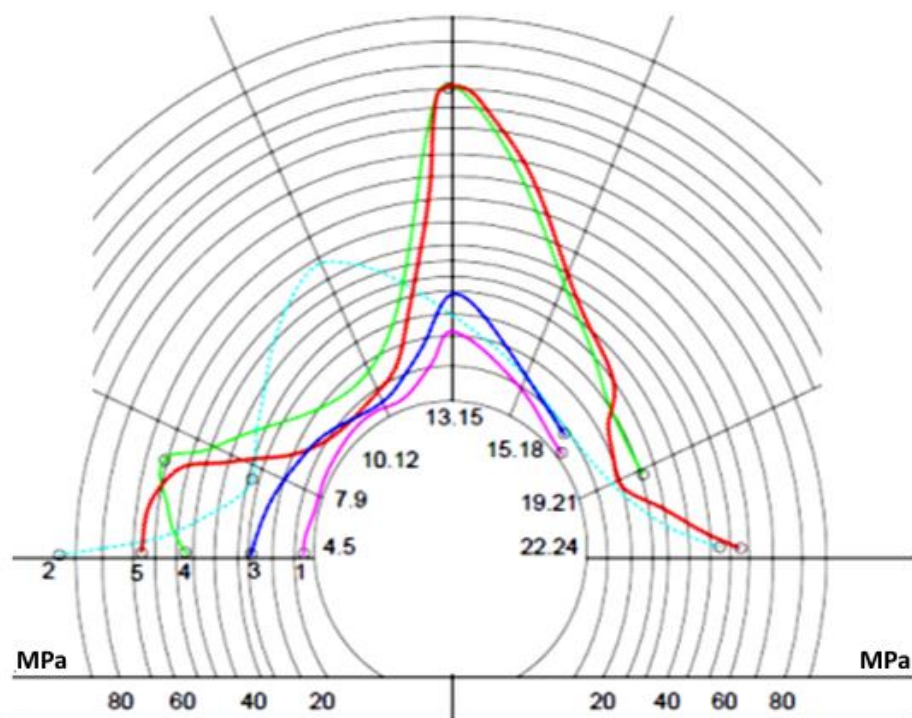


Рис. 3. Эпюры напряжений в металлической крепи: 4-24 – тензометрические датчики; 1-5 – замеры /

Fig. 3. Diagrams of stresses in the metal support: 4-24 – strain-gage indicators; 1-5 – measurements

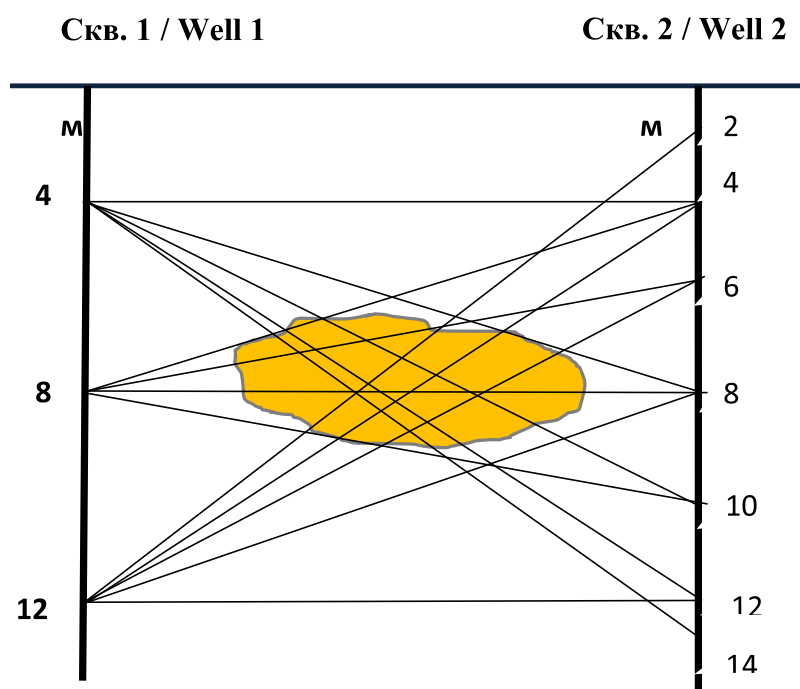


Рис. 4. Определение границ зоны неоднородности массива /

Fig. 4. Determination of the boundaries of the massif heterogeneity zone

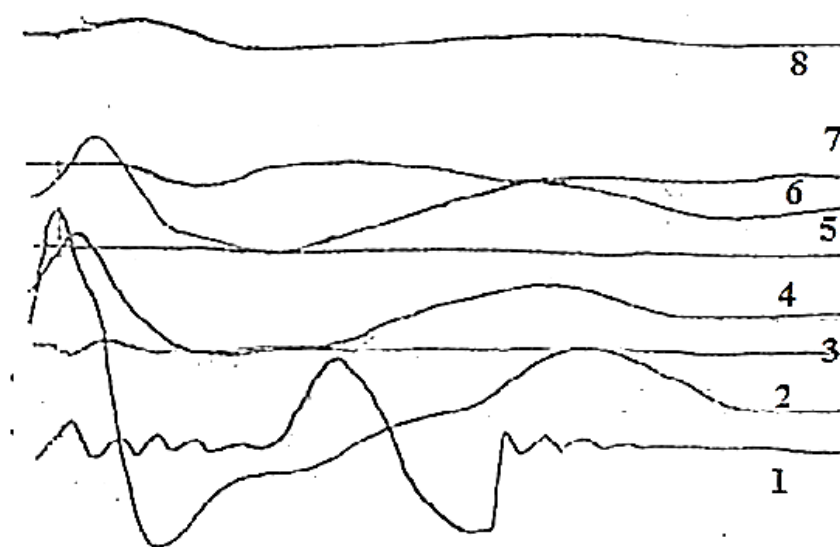


Рис. 5. Осциллограмма взрыва скважины: 1-8 – датчики /

Fig. 5. Oscillogram of the well blast: 1-8 – sensors

Параметры фильтрационной неоднородности руд, определяющей возможность применения технологий, например, выщелачивания металлов реагентами, определяли по скорости распространения волн напряжений.

Упругие колебания создавали путем взрывания зарядов взрывчатых веществ весом 2 кг. Волны напряжений улавливали с помощью датчиков, устанавливаемых в 10 точках с соблюдением условия: один датчик – вертикально, а второй – горизонтально (рис. 5).

При осознании и интерпретации совокупного воздействия динамических и статических напряжений искусственный целик идентифицируется в виде заполненной закладочным материалом выработки радиусом r (рис. 6).

Возможность эффективного использования технологий обеспечивается средствами горной геофизики с получением ожидаемых результатов.

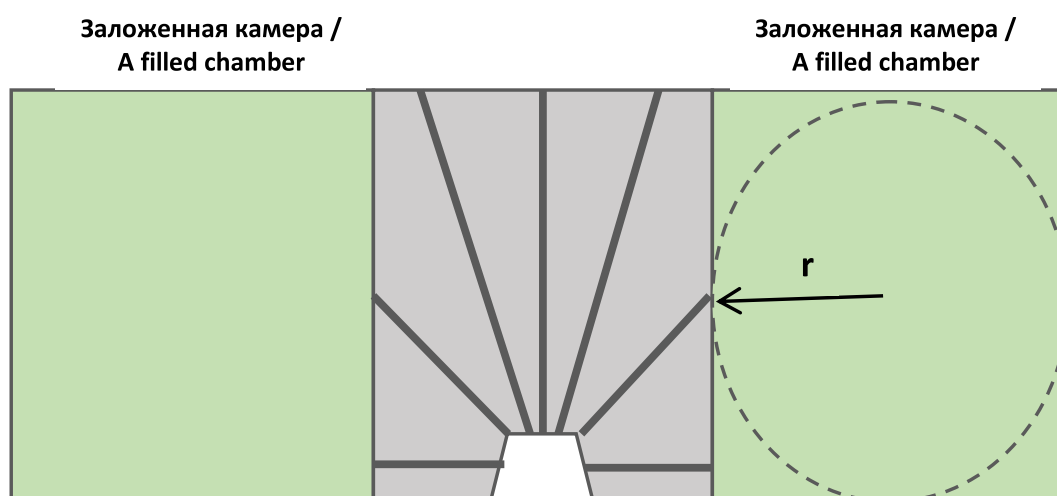


Рис. 6. Схема к определению нормальных и касательных напряжений /

Fig. 6. Scheme for determining normal and shear stresses

Анализ теории и практики управления состоянием массивов при разработке скальных месторождений подземным способом показывает:

- область применения технологий с обрушением пород сокращается по экологическим условиям;
- способ погашения с оставлением выработанного пространства открытым применяется в редких случаях при хорошей изученности объекта;
- расширение диапазона технологий с закладкой твердеющими смесями ограничивается дефицитом компонент смесей, что определяет необходимость вовлечения в сферу производства отходов производства.

Концепция экономически экологически корректных технологий подземной разработки рудных месторождений включает в себя положения:

- геомеханическая сбалансированность дискретных сред рудовмещающих массивов является неперенным условием эффективности управления ими с сохранением земной поверхности;
- технологии управления природных и искусственных массивов должны использовать феномен остаточной несущей способности структурных отдельностей путем перевода геоматериалов в режим объемного сжатия;
- рациональное использование свойств массивов достигается при комбинировании традиционных и новых способов добычи разнородных руд на основе феномена заполнения выработанного пространства выщелоченной рудой или твердеющими смесями.

Экономическая эффективность комбинирования технологий на основе геомеханики массивов описывается моделью:

$$\Pi_{\kappa} = \left[\frac{Z_{mp}}{A_{mp}} K_o^A K_o^T + \left(\frac{\varepsilon_{mp} + \varepsilon_{\phi}}{A_{mp}} \right) - \frac{Z_{\phi}}{A_{\phi}} \right] A_{\kappa} \cdot r \quad \Theta = \left[\frac{3\delta}{A\delta} K_R^A K_P^T + \left(\frac{\Delta \varepsilon_{\phi} + \Delta \varepsilon_{\kappa}}{A_{\phi}} \right) - \frac{Z_{\phi}}{A_{\phi}} \right] A \cdot r$$

где Π_{κ} – прибыль от комбинирования технологий; Z_{mp} – затраты на единицу металла при базовой технологии, ден. ед.; Z_{ϕ} – затраты на единицу металла при комбинированной технологии, ден. ед.; K_o^A – коэффициент динамичности объемов производства; K_o^T – коэффициент динамичности времени; ε_{mp} – приведенные эксплуатационные и капитальные расходы при базовой технологии, ден. ед.; ε_{ϕ} – приведенные эксплуатационные и капитальные расходы при комбинированной технологии, ден. ед.; A_{mp} – годовой объем выпуска металлов при базовой технологии, ед.; A_{ϕ} – годовой объем выпуска металлов при комбинированной технологии, ед.; A_{κ} – годовой объем выпуска металлов по комбинированной технологии, ед.; r – коэффициент риска рыночных операций.

Снижение качества добытой базовой технологией руды за счет разубоживания увеличивает потери металлов на металлургическом заводе на 1-2%. Использование комбинированных технологий повышает коэффициент извлечения на 1-1,5%.

По данным анализа комбинирование технологий по сравнению с традиционной технологией уменьшает потери металлов при добыче на 5-10%, а при обогащении на 2-2,5%.

Технологии комбинированных по критериям надежности и стоимости управления состоянием массива способствуют восстановлению промышленного потенциала Садонских месторождений [Дмитрак и др., 2006, 2019; Гавришев и др., 2017]. Совершенствование способов управления геомеханикой рудовмещающих массивов

сопровождается модернизацией остальных процессов горного производства [Комащенко, 2016; Хулелидзе, 2016; Grikorkina et al., 2017; Zaalishvili et al., 2014 a, b, 2016, 2018; Milyukov et al., 2014; Горбатиков и др., 2015]. Результаты исследования согласуются с выводами исследователей по данному направлению горного производства [Feng, 2017; Jianju et al., 2017; Li, 2017; Zaalishvili et al., 2018].

Выводы

Поведение скальных массивов сложного строения при подземной разработке месторождений определяется совместным влиянием тектонических нарушений и остаточной несущей способности дискретных пород.

Сохранность дневной поверхности обеспечивается оптимальным соотношением напряжений в элементах геомеханической системы, которое контролируется геофизическими методами в рамках непрерывного мониторинга состояния горного массива и подземных инженерных коммуникаций.

Достоверность мониторинга состояния массива определяется комплексностью и возможностями используемых методов диагностики, включающих использование средств и методов геофизики.

Литература

1. Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А., Гапонова И.В. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов. // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 46-51.
2. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Дзеранов Б.В. Управление геомеханикой массива путем оптимизации технологии разработки. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 1. – С. 127-137.
3. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Дзеранов Б.В., Чотчаев Х.О. Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 2. – С. 147-160.
4. Дребенштедт К., Голик В.И., Дмитрак Ю.В. Перспективы диверсификации технологии добычи металлов в РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. № 1 (35). – С. 125-131.
5. Дмитрак Ю.В., Логачева В.М., Подколзин А.А. Геофизическое прогнозирование нарушенности и обводненности массива горных пород. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 11. – С. 35-36.
6. Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., Харебов Г.Х. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России. // Вектор ГеоНаук. – 2019. – Т. 2. № 1. – С. 9-18.
7. Качурин Н.М., Стась Г.В., Корчагина Т.В., Змеев М.В. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса. // Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле. – 2017. – Вып. 1. – С. 170-182.
8. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283-290.
9. Комащенко В.И. Разработка взрывной технологии, снижающей вредное воздействие на окружающую среду. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 1. – С. 34-43.
10. Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А., Попова Т.М. Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 92-101.

11. Хулелидзе К. К., Кондратьев Ю. И., Заалишвили В. Б., Бетров З. С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. № 1. – С. 46-51.
12. Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Beglyakov V. U., Efremkov A. B. The concept of creating perspective technological paradigm of formation (development) of the underground space on the basis of the leading development of new approaches in construction geotechnology and geotechnics. Premises and basic provisions (part 1). // ISPCIET 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 656 (2019) 012004. IOP Publishing. – 2019.
13. Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B., Beriev O. G., Kanukov A. S., Maysuradze M. V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. // International Journal of GEOMATE. – 2016. – Vol. 10 (1). – pp. 1693-1697.
14. Feng X.-T. Rock mechanics and engineering. Vol. 4: Excavation, Support and Monitoring. 1st edition. CRC Press. // Taylor&Francis Group. – 2017. – 726 p.
15. Grigorkina G. S., Ramonova A. G., Kibizov D. D., Kozyrev E. N., Zaalishvili V. B., Magkoev T. T., Fukutani K. Probing specific oxides as potential supports for metal/oxide model catalysts: MgO (111) polar film. // Solid State Communications. – 2017. – Vol. 257. – pp. 16-19.
16. Jianju Du, Xiang Huiqin, Qingli Zeng, Luqing Zhang, Qunce Chen, Jian Zhou, Wen Meng. Estimation of the present-day stress field using in-situ stress measurements in the Alxa area, Inner Mongolia for China's HLW disposal. // Engineering Geology. – 2017. – Vol. 220. – pp. 76-84.
17. Li N. N., Chai S. B., Li H. B. Analytical study of ground motion caused by seismic wave propagation across faulted rock masses. // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2017. – Vol. 42. No. 1. – pp. 95-109.
18. Milyukov V. K., Yushkin V. D., Kopaev A. V., Mironov A. P., Demyanov G. V., Sermiyagin R. A., Basmanov A. V., Popadev V. V., Nasretudinov I. F., Zaalishvili V. B., Kanukov A. S., Dzeranov B. V. Monitoring current vertical movements of the Northern Caucasus by absolute and relative gravimetry. // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 56. No. 10. – pp. 1105-1110.
19. Zaalishvili V. B., Melkov D. A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2014. – Vol. 50. No. 5. – pp. 707-718.
20. Zaalishvili V. B., Nevskaya N. I., Melkov D. A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of Northern Caucasus. // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2014. – Vol. 50. No. 2. – pp. 263-272.
21. Zaalishvili V. B., Kanukov A. S., Melkov D. A., Makiev V. D., Dzobelova L. V. Development of a unified model of geoinformation system for city planning and integration. // International Journal of GEOMATE. – 2018. – Vol. 15. No. 51. – pp. 160-166.

References

1. Gavrishev S. E., Kornilov S. N., Pytalev I. A., Gaponova I. V. Increasing the economic efficiency of mining enterprises due to the involvement of anthropogenic geo-resources in the operation. Mining journal. 2017. No. 12. pp. 46-51. (In Russ.)
2. Golik V. I., Burdzieva O. G., Dzeranov B. V. Management of rock mass geomechanics by optimizing development technology. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 127-137. (In Russ.)
3. Golik V. I., Burdzieva O. G., Dzeranov B. V., Chotchaev Kh. O. Controlling the geodynamics of the massif by regulating the level of stresses. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 147-160. (In Russ.)
4. Drebenstedt K., Golik V. I., Dmitrak Yu. V. Prospects for diversification of metal mining technology in North Ossetia-Alania. Sustainable development of mountain territories. 2018. Vol. 10. No. 1 (35). pp. 125-131. (In Russ.)
5. Dmitrak Yu. V., Logacheva V. M., Podkolzin A. A. Geophysical forecasting of disturbance and watering of the rock mass. Mining information and analytical bulletin. 2006. No. 11. pp. 35-36. (In Russ.)

6. Dmitrak Yu. V., Tsidaev B. S., Dzaparov V. Kh., Kharebov G. Kh. Mineral resource base of non-ferrous metallurgy in Russia. *Vector GeoSciences*. 2019. Vol. 2. No. 1. pp. 9-18. (In Russ.)
7. Kachurin N. M., Stas G. V., Korchagina T. V., Zmeev M. V. Geomechanical and aerogasdynamic consequences of undermining the territories of allotments of mines in the Eastern Donbass. *Bulletin of the Tula State University. Ser. Earth Sciences*. 2017. Issue 1. pp. 170-182. (In Russ.)
8. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mountain territories*. 2020. No. 2. pp. 283-290. (In Russ.)
9. Komashchenko V. I. Development of an explosive technology that reduces the harmful effect on the environment. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*. 2016. No. 1. pp. 34-43. (In Russ.)
10. Rylnikova M. V., Vladimirov D. Ya., Pytalev I. A., Popova T. M. Robotic geotechnology as a way to increase efficiency and greening of subsoil development. *Physical and technical problems of the mineral development*. 2017. No. 1. pp. 92-101. (In Russ.)
11. Khulelidze K. K., Kondratyev Yu. I., Zaalishvili V. B., Betrozov Z. S. Assessment of primary and technogenic deposits in North Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable development of mountain territories*. 2016. Vol. 8. No. 1. pp. 46-51. (In Russ.)
12. Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Beglyakov V. U., Efremenkov A. B. The concept of creating perspective technological paradigm of formation (development) of the underground space on the basis of the leading development of new approaches in construction geotechnology and geotechnics. *Premises and basic provisions (part 1). ISPC IET 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 656 (2019) 012004.
13. Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B., Beriev O. G., Kanukov A. S., Maysuradze M. V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10 (1). pp. 1693-1697.
14. Feng X.-T. *Rock mechanics and engineering*. Vol. 4, Excavation, Support and Monitoring. 1st edition. CRC Press. Taylor&Francis Group. 2017. 726 p.
15. Grigorkina G. S., Ramonova A. G., Kibizov D. D., Kozyrev E. N., Zaalishvili V. B., Magkoev T. T., Fukutani K. Probing specific oxides as potential supports for metal/oxide model catalysts: MgO (111) polar film. *Solid State Communications*. 2017. Vol. 257. pp. 16-19.
16. Jianju Du, Xiang Huiqin, Qingli Zeng, Luqing Zhang, Qunce Chen, Jian Zhou, Wen Meng. Estimation of the present-day stress field using in-situ stress measurements in the Alxa area, Inner Mongolia for China's HLW disposal. *Engineering Geology*. 2017. Vol. 220. pp. 76-84.
17. Li N. N., Chai S. B., Li H. B. Analytical study of ground motion caused by seismic wave propagation across faulted rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2017. Vol. 42. No. 1. pp. 95-109.
18. Milyukov V. K., Yushkin V. D., Kopaev A. V., Mironov A. P., Demyanov G. V., Sermyagin R. A., Basmanov A. V., Popadev V. V., Nasretudinov I. F., Zaalishvili V. B., Kanukov A. S., Dzeranov B. V. Monitoring current vertical movements of the Northern Caucasus by absolute and relative gravimetry. *Measurement Techniques*. 2014. Vol. 56. No. 10. pp. 1105-1110.
19. Zaalishvili V. B., Melkov D. A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50. No. 5. pp. 707-718.
20. Zaalishvili V. B., Nevskaya N. I., Melkov D. A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of Northern Caucasus. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50. No. 2. pp. 263-272.
21. Zaalishvili V. B., Kanukov A. S., Melkov D. A., Makiev V. D., Dzobelova L. V. Development of a unified model of geoinformation system for city planning and integration. *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 15. No. 51. pp. 160-166

ГЕОФИЗИКА

УДК 550:34

DOI: 10.46698/VNC. 2021.49.57.006

Оригинальная статья

Сейсмометрический мониторинг неустойчивого скального массива в Гунибском районе Дагестана (Северный Кавказ)

Ш. Г. Идармачев , В. И. Черкашин , И. Ш. Идармачев 

Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра Российской Академии наук, Россия, 367030, Республика Дагестан, Махачкала, ул. Ярагского, д. 75,
e-mail: idarmachev@yandex. ru

Статья поступила: 15.04.2021, после рецензирования: 24.05.2021, принята к публикации: 04.06.2021

Резюме: Актуальность работы. Предгорная и горная часть территории Дагестана подвержена опасным геологическим процессам, в том числе и обвалам, что представляет определенную угрозу в местах проживания населения и соответствующей инфраструктуре (дороги, линии электропередач, газопроводы и д. р.). Вопрос контроля за опасными участками является очень важным и необходимым, поскольку управлять обвалами больших размеров человек не может, а вмешательство в естественный ход его развития представляется весьма проблематичным. Для минимизации ущерба необходим прогноз, с максимально допустимой точностью определяющий состояние предполагаемого обвала и зоной возможного поражения. **Цель работы** заключается в разработке новых подходов, используя геофизические наблюдения, направленные на познание исходной генетической сущности обвальных массивов, и на основе изучения полученных результатов выработать надёжные способы прогнозирования катастрофических событий. **Метод исследований.** Сейсмические датчики могут регистрировать колебания не только земной поверхности, но и отслеживать характерные особенности, связанные с состоянием отдельных массивов. На скорость распространения сейсмических волн влияет ряд факторов, таких как температура породы, влажность, механические напряжения и многие другие параметры. По изменениям сейсмических параметров горной породы можно отслеживать неустойчивое состояние скального массива, определить признаки, характерные для ускорения обвального процесса, накопления и снятия упругих напряжений в массиве, указывающих на растрескивание горных пород. Эти данные предоставляют важную информацию о развитии неустойчивости крутых склонов в сторону катастрофического разрушения. **Результаты работы.** Впервые на Кавказе исследованы кинематические параметры потенциально обвального скального массива, находящегося в условиях неустойчивого равновесия на крутом склоне, представляющего опасность обрушения на районный центр Гуниб в Дагестане. Определены количественные и качественные характеристики от различных внешних динамических воздействий, микросейсм, вызванных штормовыми циклонами в океане, землетрясениями. В рамках поставленной задачи были определены собственные частоты и амплитуды колебаний скального массива, а также его реакция на колебания удаленного сейсмического события.

Ключевые слова: сейсмометр, микросейсм, землетрясения, магнитуда, эпицентр, стоячие океанические волны, волны Лява и Релея, модулированные колебания.

Для цитирования: Идармачев Ш. Г., Черкашин В. И., Идармачев И. Ш. Сейсмометрический мониторинг неустойчивого скального массива в Гунибском районе Дагестана (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.49.57.006.

Благодарности: Магомедову Сурхаю Ахмедхановичу за помощь, оказанную им в проведении полевых работ.

Работа выполнена по госзаданию Института геологии ДФИЦ РАН № НИОКР АААА-А17-117021310201-9.

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC. 2021.49.57.006

Original article

Seismometric monitoring of unstable rock mass in the Gunib district of Dagestan (North Caucasus)

Sh. G. Idarmachev , V. I. Cherkashin , I. Sh. Idarmachev 

Institute of Geology of the Dagestan Federal research center of the Russian Academy of Sciences, 75 Yaragskogo Str., Makhachkala 367030, Russian Federation, e-mail: idarmachev@eandex.ru

Received: 15.04.2021, revised: 24.04.2021, accepted: 04.06.2021

Abstract: Relevance. The foothill and mountainous part of the territory of Dagestan is subject to dangerous geological processes, including collapses, which poses a certain threat in the places of residence of the population and the corresponding infrastructure (roads, power lines, gas pipelines, etc.). The issue of control over hazardous areas is very important and necessary, since a person cannot manage large landslides, and interference in the natural course of its development seems to be very problematic. To minimize damage, a forecast is required that determines, with maximum permissible accuracy, the state of the expected collapse and the zone of possible damage. **The aim of the work** is to develop new approaches, using geophysical observations aimed at understanding the initial genetic essence of landslides, and, based on the results obtained, to develop reliable methods for predicting catastrophic events. **Methods.** Seismic sensors can register vibrations not only of the earth's surface, but also track the characteristic features associated with the state of individual massifs. The speed of propagation of seismic waves is influenced by a number of factors, such as rock temperature, moisture, mechanical stress and many other parameters. By changes in the seismic parameters of the rock, it is possible to track the unstable state of the rock mass, to determine the signs characteristic of the acceleration of the landslide process, the accumulation and removal of elastic stresses in the mass, indicating rock cracking. These data provide important information about the evolution of steep slope instability towards catastrophic failure. **Results.** For the first time in the Caucasus, the kinematic parameters of a landslide rock mass, which is in unstable equilibrium on a steep slope, posing a danger of collapse on the regional center Gunib in Dagestan, have been investigated. The quantitative and qualitative characteristics of various external dynamic influences, microseisms caused by storm cyclones in the ocean, earthquakes have been determined. Within the framework of the task, the natural frequencies and amplitudes of the rock mass vibration were determined, as well as its response to the fluctuations of a distant seismic event.

Keywords: seismometer, microseisms, earthquakes, magnitude, epicenter, standing ocean waves, Love and Rayleigh waves, modulated oscillations.

For citation: Idarmachev Sh. G., Cherkashin V. I., Idarmachev I. Sh. Seismometric Monitoring of an Unstable Rock Mass in the Gunib district of Dagestan (North Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.49.57.006.

Acknowledgments: Magomedov Surkhay Akhmedkhanovich for the help rendered to them in carrying out field works.

The work was carried out according to the state task of the Institute of Geology of the Russian Academy of Sciences No. R & D AAAA17-117021310201-9.

Введение

Обвалы – чрезвычайно опасные явления природы, требующие специфического подхода к изучению, оценке и прогнозу их проявления и развития. Как известно, причиной обвала является нарушение равновесия между сдвигающей силой тяжести и удерживающими силами. Это чаще всего связано с увеличением крутизны склона в результате подмыва его водой, ослаблением прочности пород при выветривании или переувлажнении осадками и подземными водами, воздействием сейсмических толчков и деятельностью человека.

В настоящее время геофизические методы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности, где требуется определение физических параметров приповерхностной части геологической среды и протекающих в ней процессов. Одним из методов является сейсмометрия. При этом используются как активные, так и пассивные методы геофизики, например, для оценки состояния и свойств инженерных конструкций используется инженерная сейсмометрия [Зайцев, Костюков, 2012; Рогозин, Федотов, 2012; Садовский, Киринос, 1955; Карапетян, Айрапетян и др., 2019; Аракелян, Башилов и др., 2019; Мамаев, Дорофеев и др., 2019]. Сейсмодатчики, установленные в различных местах конструкции, при ударе фиксируют время пробега волн, затухание и их спектральные характеристики. По этим данным оценивают состояние и прочность конструкций, устанавливают наличие трещин и зоны предельных упругих напряжений и деформаций. В последние годы появились публикации, связанные с сейсмическим мониторингом неустойчивых скальных пород, оползней. Эти работы получили название – экологическая сейсмология [Burtin et al., 2016; Collins, Stock et. all., 2018]. В этом плане для нас интерес представляет сейсмический мониторинг на вершине горы Хохфгелль высотой 2592 м в южно-германских Альпах с помощью телеметрической сети сейсмических станций [Dietze et al., 2021]. Образование крупных трещин было зарегистрировано в конце XIX века, а с конца 1950-х годов возникло прогрессирующее сползание. В настоящее время ширина трещины на вершине достигла 4-5 м, а длина – 30 м и продолжает расширяться со скоростью нескольких миллиметров в месяц. В итоге на основе проведенных наблюдений в течение нескольких месяцев были выявлены сейсмические циклы, связанные с развитием неустойчивости склона. Накопление или снятие упругих напряжений в массиве горных пород приводит к изменению скорости сейсмических волн, увеличению излучения коротких сейсмических импульсов, указывающих на растрескивание. Эти данные представляют важную информацию о развитии динамических процессов на неустойчивых склонах горных пород в сторону катастрофического обрушения.

Объектом наших исследований является неустойчивый скальный массив над районным центром Гуниб (Дагестан) с населением более 2500 человек и представляющий опасность для вышеуказанного поселения (рис. 1). Опасный участок представляет собой вертикальный блок размером 20'50'60 м, оторванный от основного массива известняковой толщи, основание которого лежит на слое из алевролитистой глины мощностью до 1 метра. Данный блок вместе с глинистой подложкой наклонен под углом 40° в сторону обрыва. На вершине массива ширина трещины между целиком и неустойчивым блоком составляет около 2 м. Учитывая, что прочность на сжатие и сдвиге глины ниже, чем у известняков, деформация твердой части толщи горных пород будет происходить в сторону уклона по глинистой прослойке. В результате чего в вышележащем слое образуются вертикальные трещины отрыва.



Рис. 1. Вид скалы сверху (место установки сейсмометра С-5-С отмечен звездочкой) /
Fig. 1. View of the rock from above (the location of the C-5-C seismometer is marked with an asterisk)

Проникновение дождевой воды в трещины вызывает размокание глинистого слоя, на котором лежит трещина отрыва и тем самым активизирует деформацию массива. Измерения ширины трещины струнным датчиком погрешностью ± 10 мкм показали, что за период 7 месяцев трещина расширилась на 4450 мкм, или 4.45 мм.

Методы исследования

Для регистрации подвижек массива использовалась цифровая установка, состоящая из сейсмометра С – 5 – С, встроенного усилителя, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сопряженного с ноутбуком. Конструктивно сейсмометр С – 5 – С представляет собой электродинамический преобразователь тока с чувствительностью рабочей катушки $C_1 = 64$ В/ (м/с), периодом собственных колебаний $T=5$ с, декрементом затухания маятника $D=3$. Диапазон амплитудно-частотной характеристики составляет 0.1-100 Гц [Гармский геофизический полигон, 1990].

Для повышения чувствительности в корпусе сейсмометра встроен операционный усилитель на базе микросхемы серии КР140УД20. Диапазон измерительного канала усилителя составляет $f=0-50$ кГц, коэффициент усиления равен – 400. Чувствительность сейсмометра после подключения к усилителю составляет $C_2=25600$ В/ (м/с) или 25.6 мВ/ (мкм/с). Сейсмометр был закреплен на скале так, чтобы колебания маятника совершались поперек направления трещины, при этом допускалось, что собственные колебания скального массива будут происходить перпендикулярно трещине.

На первом этапе исследований регистрирующая аппаратура была установлена в помещении, расположенном на расстоянии 150 м от сейсмометра и подключена с помощью кабеля, натянутого над землей. Опытные измерения показали наличие больших помех в ночное время, наводимых на сигнальный провод воздушного

кабеля. Причиной наводок является возникновение разности потенциалов между поверхностью земли и проводом-антенной. Характерным свойством такого рода помех является однополярность сигнала, т. е. поверхность земли заряжена положительным потенциалом, а провод-антенна – отрицательным. В отдельных случаях амплитуда сигнала достигает 0.6-0.7 В. Земные токи возникают от разрядов молний, трения земной поверхности с атмосферой, заряженных облаков, магнитосферных и других процессов. Поэтому для удаления помех пришлось отказаться от длительных наблюдений на скальном массиве и перейти к дискретным измерениям установкой регистрирующей аппаратуры рядом с сейсмометром.

Результаты работы и их обсуждение

Для получения достоверной и необходимой информации о состоянии скального блока, а также влиянии внешних сил на его устойчивость, были использованы записи сейсмограмм, генерируемые штормовыми волнами, колебаний, вызванные механическим воздействием груза массой более 5 кг, а также под воздействием сейсмических событий.

1. Обсуждение результатов воздействия штормовых волн

После обработки данных и устранения помех была получена сейсмограмма микросейсм генерируемая гигантскими штормовыми океаническими волнами (рис. 2). Как известно, в центре циклона часто формируются гигантские стоячие волны. Область стоячих водяных волн (СВВ) генерирует периодически изменяющееся давление на дно океана, не затухающее с глубиной [Longuet Higgins, 1950; Табулевич и др., 2001]. Под влиянием этого давления в земной коре возникают слабые колебания – так называемые штормовые микросейсмы. Область стоячих водяных волн, располагающаяся в тыловой части циклона (тайфуна), составляет сотни квадратных километров. Такие колебания могут быть уподоблены поршню, совершающему возвратно-поступательные движения. Поднимаясь вверх, они образуют микробаромы в атмосфере, вниз – микросейсмы на дне океана. Колебания, вызванные стоячими волнами, когерентны (синфазны). Регистрируемые на поверхности земли упругие волны имеют форму синусоидальных колебаний [Потапов и др., 1997]. Микросейсмы, вызванные стоячими водяными волнами движущихся циклонов, распространяются на большие расстояния. Их записывают все сейсмические станции мира. Например, микросейс-

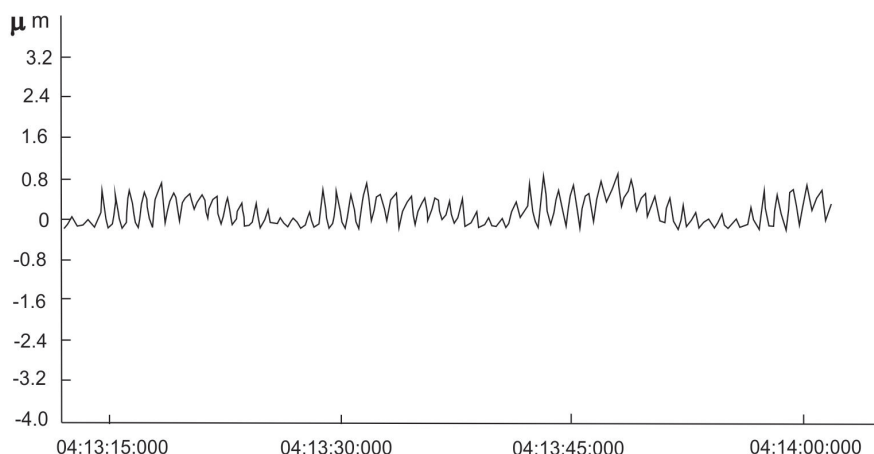


Рис. 2. Запись штормовых микросейсм/
Fig. 2. Recording of storm microseisms

мы от атлантических циклонов фиксируют не только станции, расположенные на европейском континенте, но и азиатские (в Ташкенте и Ашхабаде), сибирские (в Иркутске и Новосибирске) и многие другие. Период колебаний микросейсм может лежать в пределах 10-14 с. Чем большую площадь охватывает циклон, тем больше амплитуда и период колебаний. Микросейсм от морских штормовых волн имеют меньший период колебаний – 2-5 с и регистрируются на небольшие расстояния. Например, периоды штормовых микросейсм озера Байкал составляют $T=2-3$ с, амплитуды, записанные сетью сейсмических станций, достигают 5-10 мкм [Табулевич, 1970].

На записи, зарегистрированной на скале микросейсм, видны синусоидальные колебания с периодом $T_1=14-15$ с, вызванные штормовыми океаническими волнами, модулированные более короткопериодными колебаниями $T_2=0.87$ с, с максимальной амплитудой 0.8 мкм. Природа короткопериодных колебаний может быть связана с частотой собственных колебаний скального массива, который находится в условиях неустойчивого равновесия. В данном случае микросейсм могут служить в роли возмущающей силы, вызывающей гармонические колебания. Тогда отношение доминантной частоты к частоте возмущающей силы должно быть четное число. Для полученных по записи частот $f_2/f_1=16.0189$ практически является четным числом. Такие эффекты возбуждения собственных колебаний от возмущающей внешней силы возникают не только в геофизической среде, но и других случаях, например, при проведении диагностических исследований на металлической трубе высотой 100 м сейсмометрические наблюдения показали возникновение доминантных частот 0.01-0.5 Гц от вынуждающих переменных сил ветра [Овчаренко и др., 2012].

2. Результаты механического воздействия

На исследуемом массиве также были проведены эксперименты по возбуждению колебаний путем броска камня весом 5 кг в трещину и удара ногой об скалу. Осциллограммы записей показаны на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 видны затухающие колебания с уменьшающейся частотой. Например, в первой половине записи частота колебаний равна 68-70 Гц, а во второй половине – 46-47 Гц. Максимальная амплитуда равна 32 мкм. Также видно медленное отклонение записи от начального положения на 8 мкм. Продолжительность отклонения равна 0.8 с. Данное отклонение записи не может быть связано с периодом собственных колебаний маятника сейсмометра $C-5-C$ ($T=5$ с). По величине период отклонения записи $T=0.8$ с сравним с периодом собственных колебаний скалы $T=0.87$ с, вызванных штормовыми микросейсмами. Эти данные подтверждают возможность возбуждения собственных колебаний скалы при слабом внешнем воздействии на нее ударом камня весом 5-6 кг, брошенного с высоты 9 м.

По характеру записи колебаний на рисунке 3 можно сделать вывод об уменьшении частоты по мере удаления волны от сейсмометра – эффект Доплера. На записи при ударе ногой по скале (рис. 4) зарегистрированы колебания частотой 93-100 Гц. Более высокая частота колебаний от удара ногой об скалу связана с близким расположением источника колебаний, чем в случае броска камня в трещину. Однако в этом случае нет медленного отклонения на записи сигнала как на рисунке 3. Амплитуда колебаний от удара ногой по скале составляет 4.4 мкм, т.е. меньше амплитуды колебаний от удара броска камня в 7.3 раз. Эти записи показывают высокую чувствительность измерительной аппаратуры, позволяющей регистрировать колебания горных пород, в данном случае крепких известняков, имеющих кристал-

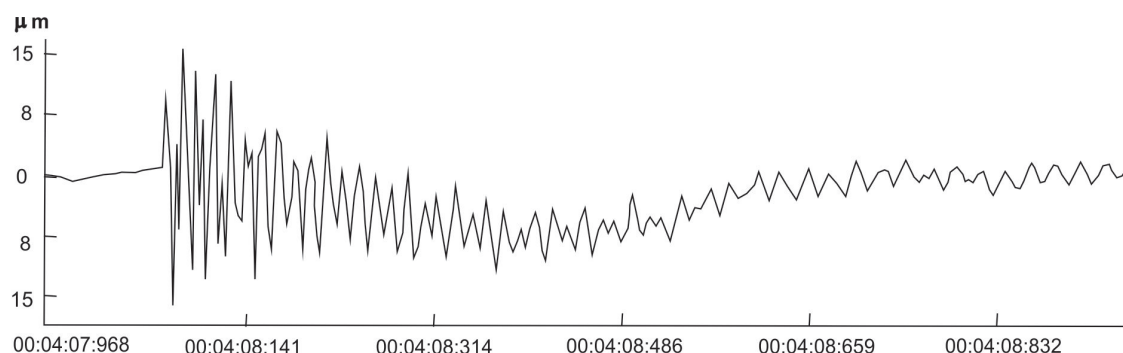


Рис. 3. Запись колебаний сейсмометра после броска камня в трещину глубиной 9 м /
Fig. 3. Recording of the seismometer vibrations after throwing a stone into a crack 9 m deep

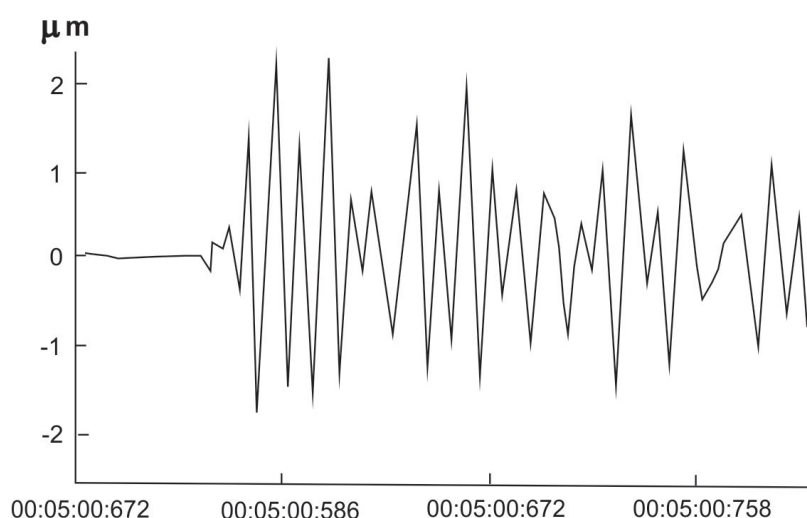


Рис. 4. Запись колебаний сейсмометра от удара ногой об скалу на расстоянии 3 м от сейсмометра /
Fig. 4. Recording of the seismometer vibrations from a kick on a rock at a distance of 3 m from the
seismometer

лическую структуру, а форма колебаний имеет резонансный характер – подобно звучанию колокола.

3. Результаты воздействия землетрясений

Довольно часто при землетрясениях на крутых склонах гор активизируются обвалы, оползни. Некоторые из них приводят к человеческим жертвам. Грандиозный обвал на Памире в результате землетрясения 1911 г. перегородил долину реки Муграб, образовав плотину шириной 5 км и высотой 600 м, вследствие чего возникло Сорезское озеро площадью более 80 тыс. км² и глубиной 500 м. Во время Хаитского землетрясения в Таджикистане 1949 г. произошли крупные обвалы и осыпи, а селение Хаит оказалось полностью погребенным под оползнем. Сильное землетрясение в Дагестане в мае 1970 г. магнитудой $M=6,6$ [Арефьев, 2003] привело к большому количеству обвалов в каньоне р. Сулак [Акаев и др., 1998]. В одном из них произошел обвал скального массива над селением Зубутли с человеческими жертвами. Эпицентр землетрясения находился на расстоянии 25 км от населенного пункта. Интенсивность сотрясений земной поверхности в эпицентре составляла 9 баллов по шкале MSK – 64, что заставило пересмотреть карту сейсмического районирования территории Дагестана. Интенсивность колебаний земли в с. Гуниб, находящегося на расстоянии 77 км от эпицентра землетрясения, составила 6 баллов

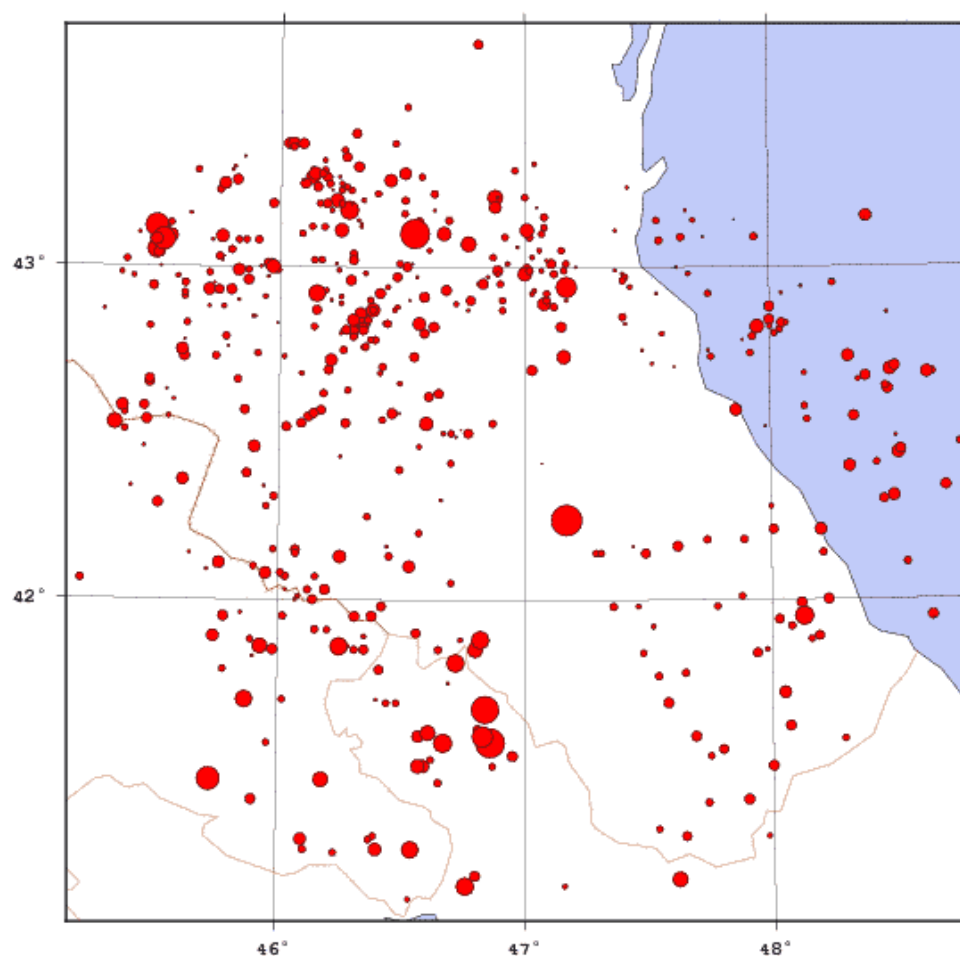


Рис. 5. Карта эпицентров землетрясений в интервале магнитуд 3,0-5,4, зарегистрированных в радиусе 150 км от с. Гуниб [www.gsras.ru/new/ssd_news.htm#].

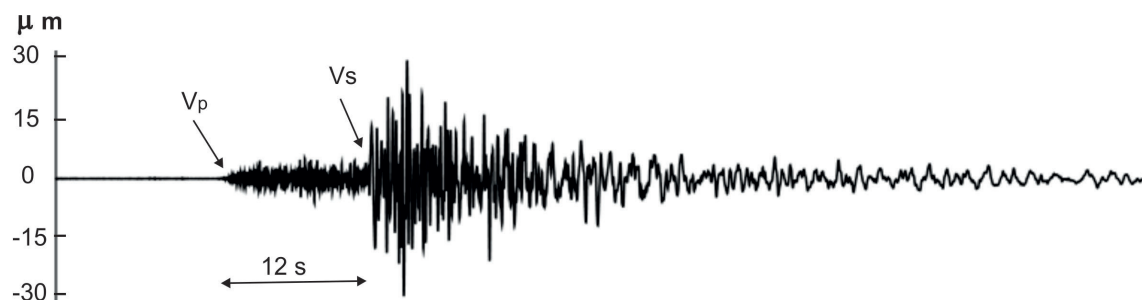
Гуниб расположен в центре квадрата /

Fig. 5. Map of earthquake epicenters in the range of magnitude 3.0-5.4 registered within a radius of 150 km from the village of Gunib [www.gsras.ru/new/ssd_news.htm#]. Gunib is located in the center of the square

[Арефьев, 2003], но крупных обвалов в данном районе не было зарегистрировано.

Сильное землетрясение – достаточно редкое явление даже для весьма активного региона как Кавказ [Шебалин, 1997]. На рисунке 5 показана карта эпицентров землетрясений за небольшой период 2015-2020 гг., зарегистрированных в радиусе 150 км от с. Гуниб.

В прошлом веке в густонаселенном районе Дагестана произошло три землетрясения – Дагестанское, Буйнакское и Кизилюртовское, приведшие к разрушениям в населенных пунктах. Землетрясения произошли в предгорном районе на пересечении нескольких глубинных разломов. Относительно сильные землетрясения происходят также на протяжении горной цепи Главного Кавказского хребта. Центральная часть Дагестана характеризуется слабой сейсмичностью, ограниченной магнитудой $M \leq 5.0-5.4$. В эту зону попадает и Гунибский район. Однако в 2017 г. здесь произошло землетрясение $M=5.4$ на эпицентральной расстоянии 20 км от Гуниба и глубиной очага 15 км. Из этого следует, что здесь может произойти и сильное землетрясение, которое будет сопровождаться обвальными процессами.

*Рис. 6. Сейсмограмма землетрясения 15.09.2020 г. /**Fig. 6. Seismogram of the earthquake of 15.09.2020*

По карте сейсмического районирования ОСР – 97 (С) весь район Дагестана относится к 10 бальной зоне. Это означает, что в любом месте может произойти землетрясение силой 10 баллов за период в 5 тыс. лет, которое будет сопровождаться обвальными и другими негативными процессами. Например, обрушение исследуемого массива, нависающего над Гунибом, приведет к катастрофическим процессам с человеческими жертвами.

За последние 3 года в Гунибском районе в зоне каньона р. Кара-Койсу произошло два крупных обвала на крутых склонах гор. Природа механизма этих обвалов пока мало изучена. Обвальный процесс принадлежит к динамическим явлениям, протекающим в нелинейных диссипативных системах. Из широкого круга исследований диссипативных систем известно, что на стадии неустойчивого равновесия усиливается влияние триггерных эффектов, приводящих к динамической неустойчивости [Hill, 2008; Ott, 2002; Gomborg, Davis, 1996; Nikolaev et al., 1993; Sholz, 1990; Sobolev et al., 1993]. Вопрос о пороге внешнего воздействия достаточного для ускорения процесса неустойчивого равновесия остается открытым.

Внешними факторами триггерного воздействия могут служить климатические аномалии – проливные дожди, колебания умеренных близких или удаленных сильных землетрясений. Известно, что сильные землетрясения магнитудой $M=9$ вызывают возникновение медленных волн Релея и Лява, способных несколько раз обогать вокруг земного шара [Рихтер, 1963]. Волны Релея вызывают смещение частиц земной поверхности по вертикали, а Лява – по горизонтали. Периоды колеблются от нескольких секунд до нескольких десятков секунд [Дубянский и др., 2005]. Амплитуды смещения могут достигать 1 см. Поверхностные волны вызывают покачивание высотных зданий амплитудой до 0.5 м; оползни, обвалы на горных склонах – возникновение трещин в грунтах, обрывы телефонных и электрических линий. Исследования авторов [Соболев, Закржевская, 2013] показывают, что поверхностные волны от сильных землетрясений на земном шаре способны влиять на сейсмический режим Камчатского региона. Наблюдалось увеличение сейсмической активности, как отклик на сильное землетрясение магнитудой $M^{37,5}$. Из этих данных следует, что землетрясения с максимально возможной магнитудой $M^{8.5-9.0}$ и выше, произошедшие на расстоянии 1000 км и более, могут вызвать обвальные процессы в массивах горных пород, находящихся в условиях неустойчивого равновесия.

За небольшой период сейсмометрических наблюдений на скале были зарегистрированы колебания землетрясения, произошедшего 15.09.2020 г. на Главном Кавказском хребте магнитудой $M=3.6$ координатами эпицентра: 42.39° с. ш., 46.49°

в. д. Эпицентр землетрясения находился от Гуниба на расстоянии 43 км. Глубина очага – 15 км (www.gsras.ru/new/ssd_news.htm#). Данная запись землетрясения приведена на рисунке 6.

На сейсмограмме выделяются две волны, вначале продольная V_p продолжительностью 12 с, с максимальной амплитудой 12.6 мкм и поперечная V_s с большей амплитудой (57 мкм) и продолжительностью 20 с. Периоды колебаний обоих волн находятся в пределах $T=1.8-2.2$ с. Сравнение периодов колебаний землетрясения и собственных колебаний скалы ($T=0.87$ с) показывает, что они не совпадают по фазе. Поэтому на записи землетрясения нет аномальных резонансных колебаний, связанных с частотой собственных колебаний.

По многочисленным записям период колебаний афтершоков Дагестанского землетрясения лежит в пределах 0.33-1.25 с [Шебалин, 1997]. Из этого видно, что периоды колебаний, зарегистрированного нами землетрясения, выходят за рамки эпицентральных записей. Однако отдельные периоды эпицентральных записей совпадают с периодом собственных колебаний исследуемого массива горных пород и может вызвать резонансный эффект.

В итоге следует отметить, что проведенные эпизодические наблюдения на скальном массиве не позволяют определить его спектральные временные характеристики, связанные с динамикой неустойчивого состояния, под воздействием внешних факторов. Для этого необходимо продолжить работы в направлении, как улучшения аппаратного обеспечения, так и в области методологии.

Выводы

1. Изучены кинематические параметры скального массива, находящегося в условиях неустойчивого равновесия. Установлено, что микросейсмы штормовых циклонов в океане периодом 14-15 с вызывают возникновение модулированных собственных колебаний массива периодом 0.87 с максимальной амплитудой 0.8 мкм.

2. При возбуждении упругих колебаний броском камня весом 5 кг в трещину, отделяющую исследуемый скальный массив от основного массива, состоящего из крепких известняковых пород, зарегистрированы затухающие колебания частотой 68-79 Гц максимальной амплитудой 28 мкм. Наблюдается также медленное отклонение записи от первоначального положения на 8 мкм периодом 0.8 с не связанного с периодом собственных колебаний сейсмометра ($T=5$ с). По величине период отклонения записи 0.8 с сравним с периодом собственных колебаний скалы 0.87 с, вызванных штормовыми микросейсмами в океане.

3. На карте сейсмического районирования ОСР – 97 (С) потенциально обвальный скальный массив над населенным пунктом Гуниб (Дагестан) расположен в 10 бальной зоне. Это означает, что сильное землетрясение может оказать триггерное воздействие на неустойчивый скальный массив, который приведет к его обрушению. Существует также опасность возникновения резонансных эффектов от воздействия колебаний поверхностных волн Релея и Лява, распространяемых от мегаземлетрясений с магнитудами 8.5-9.0 по всему земному шару.

4. Учитывая высокую опасность данных процессов для прогнозирования возможного обрушения скального массива на стадии развития геологических и метеорологических факторов, необходимо расширить изучение динамических характеристик современными методами геофизического и геодезического мониторинга в непрерывном режиме.

Литература

1. Акаев Б. А., Атаев З. В., Гаджиев Б. С. и др. Физическая география Дагестана. – М.: «Школа». – 1998. – 380 с.
2. Аракелян Ф. О., Башилов И. Л., Зубков Ю. Н., Николаев А. В., Левченко Д. Г. Оползневой риск горных районов. Сейсмическая защита АЭС, проблемы и перспективы // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. – № 3. – С. 119-138.
3. Арефьев С. С. Эпицентральные сейсмологические исследования. – М.: Академкнига, 2003. – 376 с.
4. Гармский геофизический полигон. – М.: Наука, ИФЗ РАН, 1990. – 239 с.
5. Дубянский А. И., Зайцев С. В., Силкин К. Ю. Поверхностные волны сейсмических событий в условиях Воронежского кристаллического массива. // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геофизика. – Воронеж. – 2005. – № 1. – С. 221-225.
6. Зайцев А. С., Костюков Е. А. Инженерная сейсморазведка и сейсмометрия конструкций зданий и сооружений // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 16-19. ISSN 1997-8650
7. Карапетян Д. К., Айрапетян О. Ю., Мхитарян Д. А. Анализ динамических характеристик здания комплексной конструкции с помощью Мобильной сейсмостанции нового поколения // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. – № 4. – С. 111-125.
8. Мамаев С. А., Дорофеев В. Ш., Мамаев А. С. Определение динамических параметров моделей зданий и сооружений на основе инженерно-сейсмометрической информации // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 110-121.
9. Овчаренко А. В., Беликов В. Т., Баландин Д. В. и др. Комплексный GNSS-мониторинг деформаций высотных сооружений башенного типа. // Инженерные изыскания. – 2012. – № 7. – С. 38-45.
10. Потапов В. А., Табулевич В. Н., Черных Е. Н. Влияние штормовых микросейсмических колебаний на сейсмичность в районе Курильских островов Тихого океана и на озере Байкал. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. № 8. – С. 1411-1419.
11. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 670 с.
12. Рогозин Н. А., Федотов А. С. Возможности обработки многоканальных сейсморазведочных данных. // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 29-34.
13. Садовский Е. Ф., Киринос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. – М.: Изд-во техн.-теор. лит-ры, 1955. – 544 с.
14. Соболев Г. А., Закржевская Н. А. К вопросу влияния удаленных землетрясений на сейсмичность. // Физика Земли. – 2013. – № 4. – С. 29-42.
15. Табулевич В. Н. Микросейсмические колебания в анизотропной среде. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1970. – № 9. – С. 72-75.
16. Шебалин Н. В. Сильные землетрясения. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. – 338 с.
17. Burtin A., Hovius N., Turowski J.M. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. // Earth surface Dynamics. – 2016. – Т. 4. – pp. 285-307. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-285-2016>
18. Dietze M., Krautblatter N., Illien L., Hovius N. Seismic constraints on rock damaging related to a failing mountain peak: the Hochvogel, Allgau. // Earth Surface Processes and Landforms. – 2021. – Vol. 46. No. 2. – pp. 417-429. <https://doi.org/10.1002/esp.5034>
19. Collins B., Stock G.M., Eppes M.E. et al. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation // Nature communications. – 2018. – Т. 10. – No 762. – pp. 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02728.1>
20. Gombert J., Davis S. Stress/strain changes and triggered seismicity following the M_w 7.3 Landers, California, earthquake. // J. Geophys. Res. – 1996. – Vol. 101. – pp. 751-764.

21. Hill D. P. Dinamic Stress, Coulomb failure, and remoute triggering. // B Seismol. Soc. Am. – 2008. – Vol. 98 (1). – pp. 66-91.
22. Ott E. Chaos in Dinamic System. // Cambridge University Press. – 2002. – 478 p.
23. Nikolaev A. V., Nikolaev V. A. Earth tides triggering of Continental Earthquakes. // Seismological Press. Beijing. – 1993. – pp. 319-327.
24. Sobolev G., Spetzler H., Kozlov A., Chelidze T. An experimental study of triggered stick-slip. // PAGEOPH. – 1993. – Vol. 140. No. 1. – pp. 79-94.
25. Sohlz C. H. The mechanics of earthquakes and faulting. // Cambridge University Press. – 1990. – pp. 439.

References

1. Akaev, B. A., Ataev, Z. V., Gadzhiev, B. S., et al. (1998), Physical geography of Dagestan. Moscow, School, 380 pp. (in Russ.)
2. Arefyev, S. S. (2003), Epicentral seismologicheskie issledovaniya [Epicentral seismological studies]. – Moscow: ICC “Akademkniga”. 374 pp. (in Russ.)
3. Burtin, A., Hovius, N., Turowski, JM. (2016), “Seismic monitoring of torrential and fluvial processes”, Earth surface Dinamics, T. 4, pp. 285-307. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-285-2016>
4. Collins, B., Stock, G. M., Eppes, M. E. et oll. (2018), “Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation”, Nature communications, T. 10, No. 762, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02728.1>
5. Dietze, M., Krautblatter, N., Illien, L., Hovius, N. (2021), “Seismic constraints on rock damaging related to a failing mountain peak: the Hochvogel, Allgau”, Earth Surface Processes and Landforms, T. 46, No. 2, pp. 417-429. <https://doi.org/10.1002/esp.5034>
6. Dubyansky, A. I., Zaitsev, S. V., Silkin, K. Yu. (2005), “Surface waves of seismic events in the conditions of the Voronezh crystal massif” [Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, Serya Geofizika], Voronezh, No. 1, pp. 221-225. (in Russ.)
7. Garmskij gefizicheskij polygon, (1990), [Garm geofizicheskij polygon], Moscow: Nauka, IFZ RAS, 239 pp. (in Russ.)
8. Gombert, J., Davis, S. (1996), “Stress/strain changes and triggered seismicity following the Mw 7.3 Landers, California, earthquake”, J. Geophys. Res., V. 101, pp. 751-764.
9. Hayrapetyan, F. O., Bashilov, I. L., Zubkov, Yu. N., Nikolaev, A. V., Levchenko, D. G. (2019), “Landslide risk in mountainous areas. Seismic protection of nuclear power plants, problems and prospects”, [“Opolznevoj risk v gornyh rajonah. Seismicheskayazashchita AES, problemy i perspektivy”, Geologiya i geofizika Yuga Rossii], Vladikavkas, T. 9, No. 3, pp. 119-138. (in Russ.)
10. Hill, D. P. (2008), “Dinamic Stress, Coulomb failure, and remoute triggering”, B Seismol. Soc. Am., V. 98 (1), pp. 66-91.
11. Karapetyan, D. K., Hayrapetyan, O. Yu., Mkhitarian, D. A. (2019), “Analysis of the dynamic characteristics of a complex structure building using a new generation mobile seismic station”, Geology and geophysics of the South of Russia, [Analiz dinamicheskikh harakteristik zdaniya kompleksnoj konstrukcii s pomoshch'yu mobil'noj sejsmostancii novogo pokoleniya, Geologiya i geofizika Yuga Rossii], Vladikavkas, T. 9, No. 1, pp. 110-121. (in Russ.)
12. Mamaev, S. A., Dorofeev, V. Sh., Mamaev, A. S. (2019), “Determination of dynamic parameters of models of buildings and structures based on engineering-seismometric information [“Opredelenie dinamicheskikh parametrov modelej zdaniy i soouzenij na osnove inzhenerno-sejsmometricheskoy informacii”, Geologiya i geofizika Yuga Rossii], Vladikavkas, T. 9, No. 3, pp. 111-125. (in Russ.)
13. Nikolaev, A. V., Nikolaev, V. A. (1993), “Earth tides triggering of Continental Earthquakes”, Seismological Press. Beijing., pp. 319-327.

14. Ovcharenko, A. V., Belikov, V. T., Balandin, D. V., et all. (2012), "Integrated GNSS-monitoring of deformations of high-rise tower-type structures", [Inzhenernye izyskaniya], No. 7, pp. 38-45. (in Russ.)
15. Ott, E. (2002), "Chaos in Dinamic System" Cambridge University Press, pp. 478.
16. Potapov, V. A., Tabulevich, V. N., Chernykh, E. N. (1997), *Geologiya i Geofizika*, Vol. 38, No. 8, pp. 1411-1419. (in Russ.)
17. Rogozin, N. A., Fedotov, A. S. (2012), "Possibilities of processing multichannel seismic data", *Inzhenernye izyskaniya*. Moscow, No. 11, pp. 29-34. ISSN 1997-8650 (in Russ.)
18. Richter, Ch. (1963), "Elementarnaya seismologiya" [Elementary seismology], Moscow:, 670 p. (in Russ.)
19. Sadovalsky, E. F., Kirnos, D. P. (1995), "Elements of seismology and seismometry", [Izdatel'stvo tekhnicheskoy i teoreticheskoy literatury], Moscow:, 544 p. (in Russ.)
20. Shebalin, N. V. (1997), "Sil'nye zemletryaseniya" [Strong earthquakes]. Moscow: Publishing House of the Academy of Mining Sciences, 338 p. (in Russ.)
21. Sohlz, C. H. (1990), "The mechanics of earthquakes and faulting", Cambridge University Press., pp. 439.
22. Sobolev, G., Spetzler, H., Kozlov, A., Chelidze, T. (1993), "An experimental study of triggered stick-slip", *PAGEOPH*, Vol. 140, No. 1, pp. 79-94.
23. Sobolev, G. A., Zakrzhevskaya, N. A. (2013), "On the question of the influence of remote earthquakes on seismicity", *Fizika Zemli*, Moscow:, No. 4, pp. 29-42. (in Russ.)
24. Tabulevich, V. N. (1970), "Microseismic oscillations in an anisotropic medium", *Izvestiya akademii nauk SSSR. Seriya. Fizika Zemli*, Moscow:, No. 9, pp. 72-75. (in Russ.)
25. Zaitsev, A. S., Kostyukov, E. A. (2012), "Engineering seismic survey and seismometry of structures of buildings and structures", *Inzhenernye izyskaniya*, Moscow:, No. 11, pp. 16-19. ISSN 1997-8650 (in Russ.)

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34+550.341

DOI: 10.46698/VNC. 2021.83.10.007

Оригинальная статья

Опыт детальных вероятностных оценок возможных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания

Ю. К. Чернов 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской
академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова,
93а, e-mail: chenta-26@mail.ru

Статья поступила: 01.04.2021, доработана: 28.04.2021, одобрена в печать: 17.05.2021

Резюме: Актуальность работы. В настоящее время во многих сейсмоактивных районах Российской Федерации (включая и территорию РСО-Алания) наблюдается определенный дефицит точных и детальных данных о возможных на этих территориях сейсмических воздействиях. Помимо того, что без этих данных не могут решаться многие академические задачи инженерной и общей сейсмологии, они также необходимы для обеспечения должного качества антисейсмического проектирования и прогнозов сейсмического риска, принятия эффективных управленческих решений и других мер защиты населения, объектов инфраструктуры и окружающей среды от возможных здесь сильных землетрясений. Поэтому настоящее исследование, направленное на уменьшение дефицита таких данных в сейсмогеологических условиях РСО-Алания представляется актуальным. **Цель исследования.** Совершенствование методики и получение на этой основе более точных и детальных вероятностных оценок **используемых в инженерно- сейсмологической практике параметров колебаний грунта при землетрясениях, представляющих опасность для территории РСО-Алания.** **Методы исследования.** Работа выполнена с использованием оригинальной вероятностной технологии оценки сейсмической опасности, включающей в себя разработку на основе анализа большого объема экспериментальных данных по инструментальной регистрации и макросейсмическому описанию землетрясений Кавказа и других сейсмоактивных районов мира региональных моделей сильных движений грунта и сейсмичности с последующими расчетами (на основе формулы полной вероятности) результирующих характеристик возможных сейсмических воздействий на исследуемой территории. **Результаты.** Впервые для изучаемого района с единых методологических позиций получены уточненные вероятностные оценки широкого перечня параметров (макросейсмических интенсивностей, амплитуд, периодов, длительностей, спектров и акселерограмм) колебаний грунта при возможных на данной территории землетрясениях со средними периодами повторяемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет, которые в ряде случаев существенно отличаются от действующих нормативов. Например, показано, что на изучаемой территории прогнозируемые амплитуды и спектры ускорений грунта в пределах одной и той же зоны балльности могут существенно (до 100%) различаться в зависимости от периодов повторяемости ожидаемых землетрясений. Вероятные спектры реакции ускорений колебаний грунта, в зависимости от частот спектральных составляющих также могут существенно (до 100%) отличаться от нормативных спектров.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, сейсмические воздействия, детальное сейсмическое районирование, макросейсмическая интенсивность, вероятностные оценки параметров колебаний грунта.

Для цитирования: Чернов Ю.К. Опыт детальных вероятностных оценок возможных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. *Геология и Геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): xx-xx. DOI: 10.46698/VNC. 2021.83.10.007.

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC. 2021.83.10.007

Original paper

The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania

Yu. K. Chernov 

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: chenta-26@mail. ru

Received: 01.04.2021, revised: 28.04.2021, accepted: 17.05.2021

Abstract: Relevance. At present, in many seismically active regions of the Russian Federation (including the territory of North Ossetia-Alania), there is a certain deficit of accurate and detailed data on possible seismic effects on these territories. In addition to the fact that without these data many academic problems of engineering and general seismology cannot be solved, they are also necessary to ensure the proper quality of earthquake-proof design and seismic risk predictions. These data is also necessary to make effective management decisions and other measures to protect the population, infrastructure and the environment from possible strong earthquakes. Therefore, the present study aimed at reducing the deficit of such data in the seismogeological conditions of North Ossetia-Alania is relevant. **Aim.** Improvement of the methodology and obtaining, on this basis, more accurate and detailed probabilistic estimates of the ground vibration parameters used in engineering and seismological practice during earthquakes, which are dangerous for the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. **Methods.** The work was carried out using an original probabilistic technology for seismic hazard assessment, which includes the development, based on the analysis of a large amount of experimental data on instrumental registration and macroseismic description of earthquakes in the Caucasus and other seismically active regions of the world, regional models of strong ground motion and seismicity with subsequent calculations (based on the formula for complete probabilities) of the resulting characteristics of possible seismic effects on the studied territory. **Results.** For the first time for the studied territory, from a unified methodological standpoint, refined probabilistic estimates of a wide range of parameters (macroseismic intensities, amplitudes, periods, durations, spectra and accelerograms) of ground vibrations were obtained for possible earthquakes in a given territory with average recurrence periods of 500, 1000, 2500 and 5000 years, which in some cases differ significantly from the current standards. For example, it has been shown that in the considered territory the predicted amplitudes and spectra of ground accelerations within the same magnitude zone can differ significantly (up to 100%) depending on the recurrence periods of expected earthquakes. The probable response spectra of ground vibration accelerations, depending on the frequencies of the spectral components, can also significantly (up to 100%) differ from the standard spectra.

Keywords: seismic hazard; seismic impacts; detailed seismic zoning; macroseismic intensity; probabilistic estimates of soil vibration parameters.

For citation: Chernov Yu. K. The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): xx-xx. DOI: 10.46698/VNC. 2021.83.10.007.

Введение

Отечественными нормативами предусмотрены три типа оценок сейсмических воздействий, различающихся масштабами объектов исследования, а также точностью и полнотой описания прогнозируемых характеристик – оценки, получаемые в

результате общего сейсмического районирования (ОСР), детального сейсмического районирования (ДСР) и сейсмического микрорайонирования (СМР). Менее точными и информативными являются карты ОСР, более точными и информативными – карты СМР. ДСР занимает промежуточное положение.

Для территории Российской Федерации (а ранее Советского Союза) создано уже несколько поколений нормативных карт ОСР – сначала детерминистских, а затем вероятностных (см., [Сейсмическое..., 1980; Ulomov et al., 1999; Уломов, 2012; Завьялов и др., 2018]). Нарботан также определенный опыт вероятностных оценок типа СМР. Вероятностные же оценки типа ДСР пока очень малочисленны. На Северном Кавказе такие исследования стали проводиться Геофизическим институтом ВНЦ РАН начиная с 2007-2008 гг. и дали ряд новых и важных результатов [Заалишвили, 2009; Заалишвили и др., 2011]. Однако некоторые ограничения используемых в этих исследованиях методик и исходных данных, делают актуальной задачу наращивания дальнейших усилий в данном направлении. Поэтому в ГФИ ВНЦ РАН начиная с 2017 г. стал разрабатываться новый вариант вероятностной карты ДСР РСО-Алания. Цель этих исследований – совершенствование технологии детальных вероятностных оценок и получение для данной территории новых и более точных оценок возможных сейсмических воздействий. Для достижения данной цели решались следующие задачи: разработка адекватной условиям исследуемой территории вероятностной расчетной схемы, включая создание эффективных региональных моделей сильных движений грунта и сейсмичности; производство на этой базе уточненных и детализированных вероятностных оценок макросейсмических балльностей, пиковых амплитуд, периодов, длительностей, спектров и акселерограмм ускорений колебаний грунта при возможных на территории РСО-Алания землетрясениях со средним периодом повторяемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет. Описание способов и результатов решения вышеозначенных задач и является содержанием настоящей статьи.

Информационная база и методика исследования

Исследования проводятся с использованием апробированной на региональном и локальном уровне во многих сейсмоактивных районах вероятностной технологии оценки сейсмической опасности [Zaalishvili, Chernov, 2018]. Согласно данной технологии вероятностный анализ сейсмической опасности (probabilistic seismic hazard analysis или PSHA) производится по принципу оценки полной вероятности, т. е. с учетом как условной вероятности, описывающей неопределенности, связанные с прогнозированием параметров сотрясений грунта при возникновении потенциально опасных очагов землетрясений, так и безусловной вероятности, описывающей неопределенности возникновения этих очагов в данном месте в заданный промежуток времени. Получаемая в результате PSHA оценка, представляет собой суперпозицию воздействий всех потенциально опасных очагов землетрясений с учетом их повторяемости в пространстве и во времени. Для реализации общей расчетной схемы разработаны две группы региональных моделей. Первая – вероятностные модели сейсмичности, описывающие зоны ВОЗ, возможные магнитуды землетрясений (M), размеры, механизмы, ориентацию в пространстве и частоту возникновения очагов землетрясений во времени, их распределение по глубине. Вторая – вероятностные модели сильных движений грунта (СДГ), описывающие пиковые амплитуды (точнее среднегеометрические значения между пиковыми амплитудами

на двух горизонтальных компонентах записи – PGA), относительные длительности ($\tau_{0,3}$), периоды (T_a), спектры Фурье ($|S| (f)$), спектры реакции ($SA (f)$), макросейсмические балльности (I) и акселерограммы при землетрясениях разных магнитуд (M) и расстояний до очага (D). Эти две группы моделей, подробно в [Чернов и др., 2018; Чернов Ю. и др., 2020].

Для учета всех потенциально опасных для территории РСО-Алания очагов землетрясений, анализировался достаточно большой ($\sim 325 \times 325$ км²) район, включающий территорию Республики (см. [Чернов и др., 2018]). Этот район разбит на элементарные участки размером 5×5 кв. км, каждый из которых до глубины ~ 30 км в соответствии с разработанными моделями СДГ и сейсмичности характеризуется набором параметров, определяющих уровень и вероятность прогнозируемых сейсмических воздействий (см. [Zaalishvili, Chernov, 2018]). Итоговые оценки (функции распределения вероятностей) каждого параметра рассчитываются для каждого элементарного участка как суперпозиция воздействий всех очагов, находящихся под ним и под всеми окружающими его элементарными участками. Все оценки проведены для «средних» грунтовых условий и для землетрясений со средним периодом повторяемости $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет (вероятности превышения $P_{50}=0,1; 0,05; 0,02, 0,01$ за время экспозиции 50 лет).

Первичные оценки вероятных значений I , PGA и $SA (f)$ для каждого элементарного участка, с применением элементов технологии «логического дерева» (см. например, [Delavaud et al., 2012; Akkar et al., 2014; Kale, Akkar, 2017]) сначала выполнялись в нескольких альтернативных вариантах, а затем объединялись в итоговые оценки. Первичные оценки I для каждого значения t выполнены в пяти вариантах, два из которых – прямые расчеты с использованием «традиционной» ($I_{тр}$) и «спектральной» ($I_{сп}$) моделей балльности (см. [Чернов Ю. и др., 2020]), остальные три – оценки, полученные пересчетом по выражениям (13), (15), (16) из [Zaalishvili, Chernov, 2018]. Пиковые ускорения также сначала оценивались прямыми расчетами по описанным в [Чернов Ю. и др., 2020] региональным моделям $PGA (M, D)$, которые затем дополнены еще тремя вариантами, полученными пересчетом I в PGA по соотношениям из [Zaalishvili, Chernov, 2018, (выражения (13), (15), (16))].

Первичные оценки спектров реакции выполнены в трех вариантах. Первый (основной) и второй (дополнительный) – это пересчеты полученных интегральных спектров Фурье по методике, описанной в [Ванмарке, 1981; Соколов, 1991] и по выражению, составленному нами по данным [Atkinson, Sonley, 2000]:

$$\lg SA (f) = 0,877 \lg |S| (f) + 0,581 \lg (f) + 0,919, \quad (1)$$

где $|S| (f)$ и f – уровень спектральной плотности Фурье и частота спектральной составляющей, соответственно.

Третий вариант (тоже дополнительный) – стандартные спектры, вытекающие из полученных, а затем преобразованных в эффективные ускорения (см. ниже) интегральных оценок PGA и рекомендуемой российскими строительными нормативами стандартной кривой динамичности.

Итоговые оценки I , PGA и $SA (T)$ рассчитывались как средневзвешенные по всем вариантам расчетов с весами, заданными исходя из точности варианта первичной оценки.

Чтобы обеспечить прямую сопоставимость результатов, получаемых в настоящих исследованиях с действующими нормативами итоговые карты построены в баллах макросейсмической шкалы и в «эффективных» ускорениях колебаний грун-

та ($a_{\text{эфф}}$), которые по смыслу совпадают с нормативными коэффициентами сейсмичности и численно равны $0,75 PGA$. Физический смысл «эффективных» ускорений состоит в том, что они отражают не какую-либо одну максимальную амплитуду на данной записи ускорений, а характеризуют некоторый средний уровень амплитуд на участке акселерограммы, на котором выделяется основная часть сейсмической энергии.

Зонирование изучаемой территории по уровням I и $a_{\text{эфф}}$ осуществлялось путем объединения элементарных участков с близкими оценками этих параметров, полученными для заданных P_{50} или t .

Привязка получаемых нами оценок к нормативным характеристикам сейсмической опасности (к оценкам I) сохранена и в отношении других прогнозируемых параметров сейсмических воздействий – T_a , $\tau_{0,3}$, $|S|$ (f), SA (f) и акселерограмм. Для этого в каждой выделенной по значениям I и t зоне выбран «представительный» элементарный участок, для которого производились соответствующие оценки. Территориально эти участки расположены вблизи «центров тяжести» этих зон и характеризуются средними (среди участков данной зоны) значениями I .

Результаты и обсуждение

Результаты площадного распределения независимых вероятностных оценок I , полученных для элементарных участков на основе традиционной и спектральной моделей балльности показаны на рисунке 1.

На этом рисунке (для его упрощения) приведены не все оценки, а только полученные для участков, расположенных через один. В совокупности они составля-

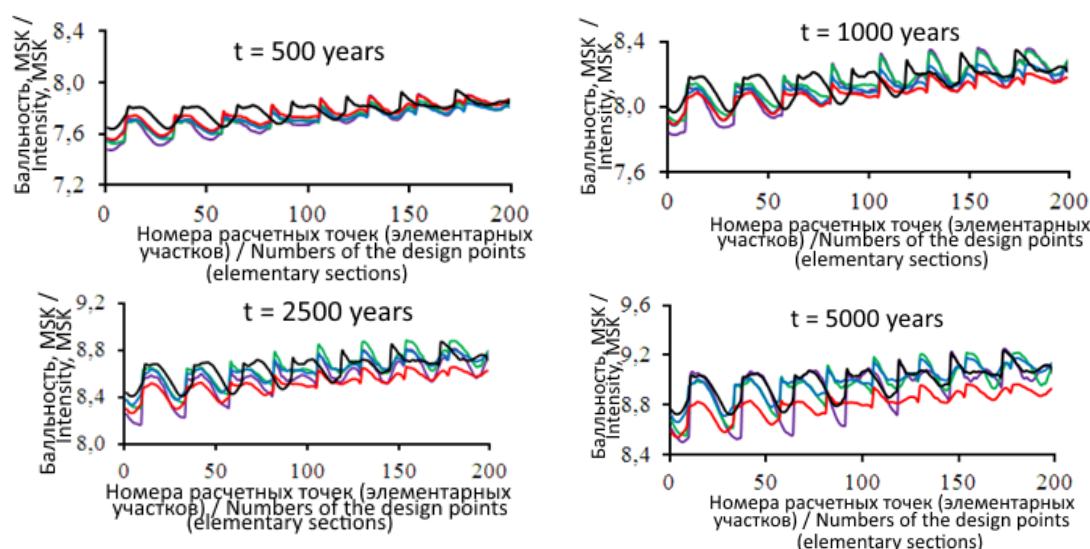


Рис. 1. Оценки макросейсмических балльностей, полученных для элементарных участков на территории РСО-Алания при землетрясениях с разными t . Зеленый и фиолетовый цвета – прямые оценки по «спектральной» и «традиционной» моделям балльности, соответственно. Синий, красный и черный цвета – пересчет из ускорений при помощи выражений (13), (15) и (16) из [Zaalishvili, Chernov, 2018], соответственно /

Fig. 1. Assessments of macroseismic intensities obtained for elementary areas on the territory of RNO-Alania during earthquakes with different t . Green and purple colors are direct assessments for “spectral” and “traditional” intensity models, respectively. Blue, red and black colors denote recalculation of accelerations using expressions (13), (15) and (16) from [Zaalishvili, Chernov, 2018], respectively

ют квадрат (размером $\sim 140 \times 140 \text{ км}^2$), в который вписана территория РСО-Алания. Нумерация начинается с крайней северо-западной точки и возрастает в восточном направлении последовательно смещающимися с севера на юг рядами по 14 точек в ряду.

Сравнение между собой полученных для каждого из элементарных участков независимых оценок с использованием двух разных моделей балльности показывает их близость. Средние по всей территории РСО-Алания значения разностей $I_{\text{сп}} - I_{\text{тр}}$ для разных значений t колеблются от 0,033 до 0,112 балла *MSK* при стандартах от

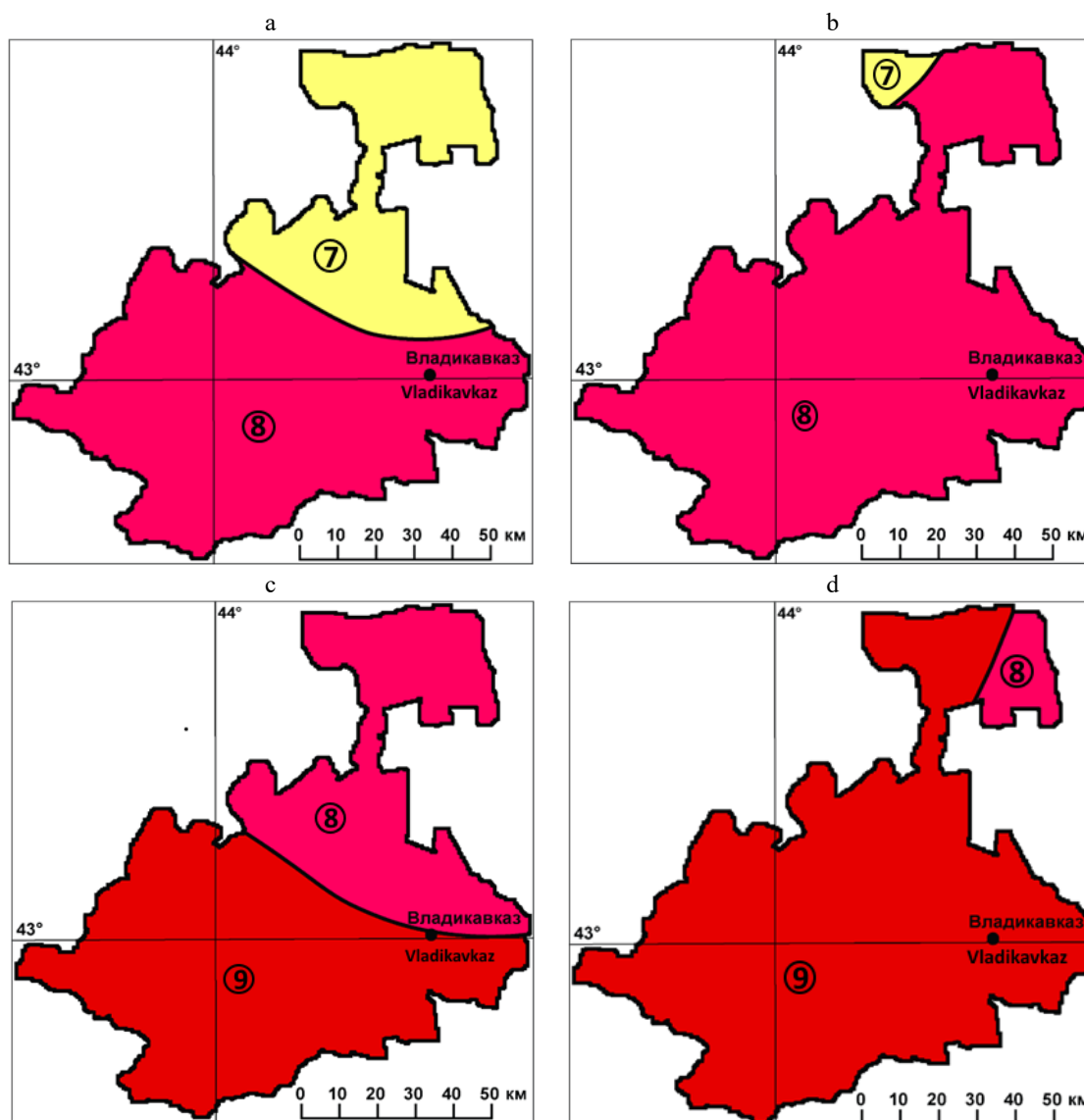


Рис. 2. Зоны с различными значениями макросейсмических интенсивностей сотрясений, выделенные по интегральным вероятностным оценкам на территории РСО-Алания при возможных землетрясениях с $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет, обозначенные индексами а, б, с и d, соответственно. Желтый, малиновый и темно-красный цвета с цифрами в кружках обозначают интенсивности 7, 8 и 9 баллов, соответственно /

Fig. 2. Zones with different values of macroseismic intensities of vibration, identified by integral probabilistic assessments on the territory of RNO-Alania during possible earthquakes with $t = 500, 1000, 2500$ and 5000 years, indicated by the indices a, b, c and d, respectively. Yellow, crimson and dark red colors denote the intensities of 7, 8 and 9 points, respectively

0,044 до 0,11 балла *MSK*. Такая близость двух независимых оценок *I* в сочетании с проведенным в [Чернов и др., 2018; Чернов Ю. и др., 2020] анализом надежности используемых в расчетах моделей сейсмичности и СДГ может свидетельствовать об их обоснованности и реалистичности.

Прямые оценки вероятных ускорений (см. выше) также рассмотрены на предмет их надежности и реалистичности. Для этого наиболее вероятные значения *PGA* пересчитаны по выражениям (13), (15) и (16) из [Zaalishvili, Chernov, 2018] в значения *I*, которые затем (на рис. 1) сопоставлены с независимыми определениями балльности. Сопоставления показывают высокую степень сходимости прямых и пересчитанных из *PGA* оценок *I* по всей рассматриваемой территории для всех периодов повторяемости сотрясений. Так, например, среднее значение разностей между пересчитанными и прямыми оценками *I* составляет – 0,118 *MSK* при стандарте 0,151 *MSK*.

Считая качество полученных первичных оценок достаточным, итоговые вероятные значения *I* для каждого *t* рассчитаны как средневзвешенные значения, когда прямым оценкам, как более точным приданы веса по 3, а пересчитанным – по 1. В случае аналогичных построений для *PGA* прямой (основной) оценке придан вес 4, остальным – по 1. Результаты итоговых построений в виде карт распределения по территории РСО-Алания макросейсмических интенсивностей сотрясений и эффективных ускорений колебаний грунта приведены на рисунках 2 и 3.

При разграничении различных зон на этих картах первоначально полученные дробные оценки *I* в соответствии с градациями, предусмотренными российскими строительными нормативами, округлялись до целочисленных значений. При выделении зон, различающихся по величине $a_{эфф}$ также использовано округление полученных дробных величин до значений 1,0 м/с², 2,0 м/с² и 4,0 м/с², совпадающих с применяемыми в российских нормативах расчетными ускорениями при интенсивностях сотрясений 7, 8 и 9 баллов *MSK*.

Сопоставление между собой рисунков 2 и 3 показывает высокий уровень их согласованности. Особенно это видно на примере зон, выделяемых по параметрам *I* и $a_{эфф}$ для землетрясений с $t = 500, 1000$ и 2500 лет. Несколько большее расхождение в границах между зонами, выделенными для землетрясений с $t = 5000$ лет, связано с меньшей точностью оценок «на хвостах» оцениваемых функций распределения вероятностей. Этот результат в сочетании с результатами предыдущих сопоставлений независимых «точечных» оценок, показанных на рисунке 1, свидетельствует о том, что выполненные для территории РСО-Алания вероятностные оценки *I* и *PGA* (или $a_{эфф}$) в достаточной степени обоснованы и обладают «внутренней» согласованностью.

Для выяснения «внешней» согласованности наши оценки сопоставлены с результатами, полученными ранее для данной территории при проведении работ по ОСП [Комплект..., 1995] и по ДСР [Заалишвили, 2009; Заалишвили и др., 2011], выполненных при помощи вероятностных технологий концептуально совместимых с нашей технологией – технологии ОСП-97 (ОСП-2015) и технологии SEISRISK, соответственно. Сравнение показывает в целом более низкий (в среднем на 0,3-0,5 балла *MSK*) уровень сейсмической опасности на картах настоящего исследования относительно Карт ОСП и, наоборот, примерно на столько же более высокий, по отношению к более ранним версиям ДСР. Такие же соотношения наблюдались нами и в результате более широких сопоставлений вероятностных оценок сейсмической

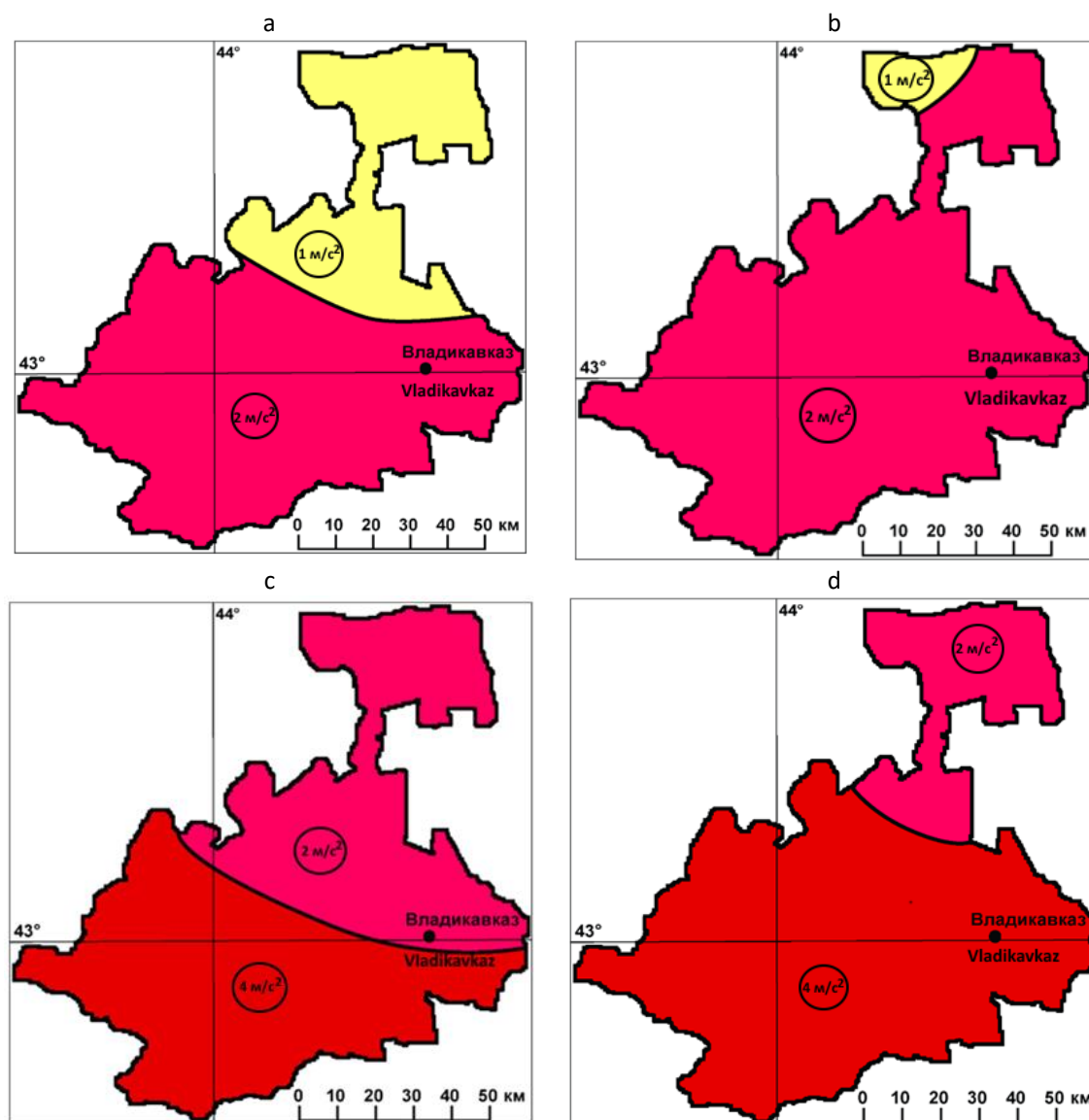


Рис. 3. Зоны с различными значениями эффективных ускорений колебаний грунта, выделенные по интегральным вероятностным оценкам на территории РСО-Алания при возможных землетрясениях с $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет, обозначенные индексами а, б, в и г, соответственно. Желтый, малиновый и темно-красный цвета с цифрами в кружках, обозначают величины $a_{эфф} = 1,0 \text{ м/с}^2, 2,0 \text{ м/с}^2$ и $4,0 \text{ м/с}^2$, соответственно /

Fig. 3. Zones with different values of effective ground vibration accelerations, identified by integral probabilistic assessments on the territory of RNO-Alania during possible earthquakes with $t = 500, 1000, 2500$ and 5000 years, indicated by indices a, b, c and d, respectively. Yellow, crimson and dark red colors denote the values $a_{eff} = 1.0 \text{ m/s}^2, 2.0 \text{ m/s}^2$ and 4.0 m/s^2 , respectively

опасности, выполненных разными авторами в различных сейсмоактивных районах мира с использованием вышеуказанных трех технологий. Попутно можно отметить, что к сходным выводам относительно оценок ОСР-97 пришли, например, авторы работ [Zhang et al., 1999; Balassanian et al., 1999]. Среди возможных причин указанных расхождений в случае ОСР, можно предположить использование в расчетах более мелких (по сравнению со многими другими оценками) глубин очагов землетрясений и более интенсивных функций затухания балльности. Оценки же типа SEISRISK могут быть более низкими, из-за более генерализованного (не учи-

тывающие, например, распределение очагов землетрясений по глубине) описания очаговых зон.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ позволяет считать, что описанные выше вероятностные оценки I и PGA (или $a_{эфф}$) могут считаться в достаточной мере обоснованными и реалистичными.

Данные на рисунках 2 и 3 являются обобщенными, что, как сказано выше, связано с необходимостью соответствовать отечественным нормативам. Но результаты настоящих исследований позволяют также рассмотреть данные оценки более подробно. Так, например, из приведенных в таблице 1 и на рисунке 4а данных видно, что значения параметров колебаний, рассчитанные для зон с одной и той же балльностью, но для землетрясений с разными t могут отличаться от обобщенных (т.е. не учитывающих к каким по величине t землетрясениям они относятся). Именно такие (обобщенные) оценки определены в результате исследований по ОСР территории Российской Федерации.

В то же время, как видно из таблицы 1 и рисунка 4а, значения PGA , T_a , $\tau_{0,3}$ и $|S|$ (f) в одних и тех же зонах балльности могут флуктуировать в зависимости от величины t . Наибольшие флуктуации наблюдаются в зонах с $I = 8$ баллов MSK , для величин PGA и $|S|$ (f) и для землетрясений с $t=500$, 1000-2500 и 5000 лет. Различий же между оценками для землетрясений с $t=1000$ лет и $t=2500$ лет, а также для зон других балльностей и для других параметров либо почти нет, либо они незначительны.

С учетом вышеуказанных различий $|S|$ (f) итоговые (средневзвешенные, см. выше) оценки спектров реакции тоже сделаны отдельно для каждой зоны и для землетрясений с разными t . Результаты представлены на рисунке 4б, где наблюдаются те же соотношения, что и на рисунке 4а. На основе данных таблицы 1 и рисунка 4 определены итоговые значения прогнозируемых параметров сейсмических воздействий на территории РСО-Алания (табл. 2). Для зон с $I=7$ баллов MSK и зон с $I=9$ баллов MSK итоговые оценки определены как среднегеометрические значения между оценками для $t=500$ и 1000 лет в первом случае и с $t=2500$ и 5000 лет, во

Таблица 1 / Table 1

Интегральные вероятностные оценки PGA , T_a и $\tau_{0,3}$ в пределах, выделенных на территории РСО-Алания зон с разными I при землетрясениях с разными t . PGA в см/с²; T_a и $\tau_{0,3}$ в с / Integral probabilistic assessments of PGA , T_a and $\tau_{0,3}$ within the limits identified on the territory of RNO-Alania with different I during earthquakes with different t . PGA in cm/s²; T_a and $\tau_{0,3}$ in s

t , лет / t , years	Зоны с $I=7$ MSK / Zones with $I=7$ MSK			Зоны с $I=8$ MSK / Zones with $I=8$ MSK			Зоны с $I=9$ MSK / Zones with $I=9$ MSK		
	PGA	T_a	$\tau_{0,3}$	PGA	T_a	$\tau_{0,3}$	PGA	T_a	$\tau_{0,3}$
500	129	0,32	4,5	192	0,36	5,0	-	-	-
1000	137	0,35	5,0	265	0,40	6,5	-	-	-
2500	-	-	-	270	0,40	6,5	457	0,44	8,1
5000	-	-	-	368	0,43	7,4	501	0,44	8,2
Общее* / Total	133	0,33	4,7	267	0,40	6,3	479	0,44	8,1

* – среднегеометрические значения по оценкам с разными t . / * – geometric mean values according to the assessments with different t .

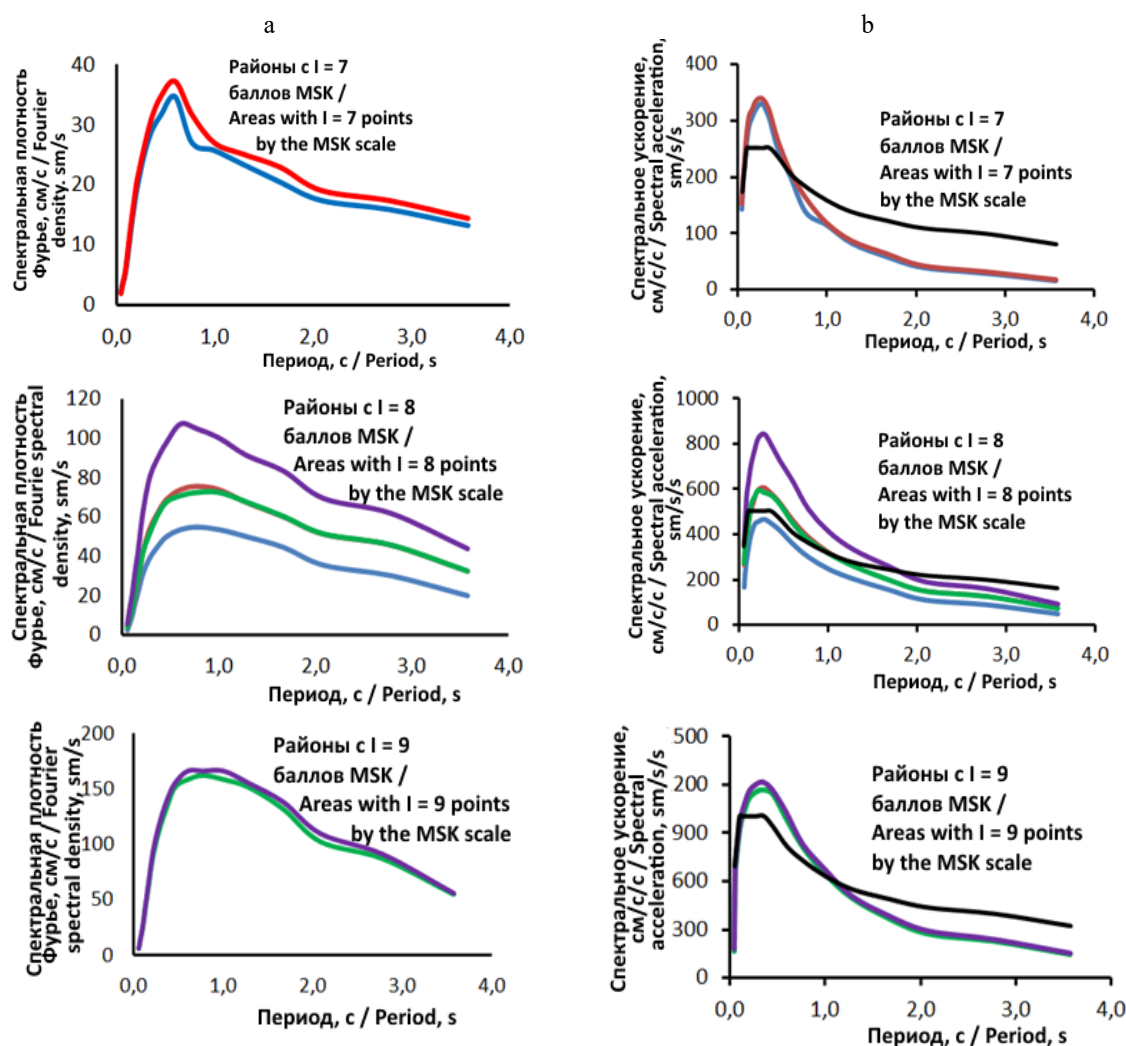


Рис. 4. Интегральные спектры Фурье (а) и итоговые (средневзвешенные) и стандартные спектры реакции (б) ускорений колебаний грунта, рассчитанные для «представительных» точек в выделенных на территории РСО-Алания зонах с $I=7, 8$, и 9 баллов MSK при землетрясениях с $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет (синий, красный, зеленый, сиреневый цвета, соответственно) / Fig. 4. Integral Fourier spectra (a) and final (weighted average) and standard response spectra (b) of ground vibration accelerations, calculated for “representative” points in the zones allocated on the territory of RNO-Alania with $I = 7, 8$, and 9 MSK points at earthquakes with $t = 500, 1000, 2500$ and 5000 years (blue, red, green, lilac colors, respectively)

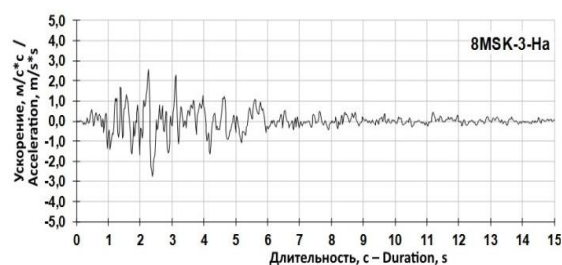
втором. В таблице 2, помимо описанных выше параметров, приведены оценки пиковых горизонтальных ускорений (PHA), пиковых вертикальных ускорений (PVA) и относительных длительностей ($\tau_{0,5}$), полученные пересчетом по рекомендованным в [Zaalishvili, Chernov, 2018] средним соотношениям – $PGA=0,86$ $PHA=1,33$ PVA и $\tau_{0,3}=1,7$ ($1,5-2,0$) $\tau_{0,5}$.

На базе приведенных на рисунке 4б и в таблице 2 данных разработаны наборы акселерограмм для землетрясений с $t=500-1000$ лет в зонах с $I=7$ баллов MSK, для землетрясений с $t=500$ лет, с $t=1000-2500$ лет и с $t=5000$ лет в зонах с $I=8$ баллов MSK и для землетрясений с $t=2500-5000$ лет в зонах с $I=9$ баллов MSK. Каждый набор состоит из 10 трехкомпонентных акселерограмм (5 из них получены искусственной генерацией и 5 – подбором записей реальных землетрясений). Формат

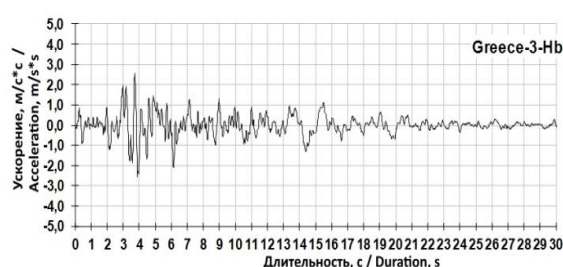
Таблица 2 / Table 2

Рекомендуемые значения пиковых ускорений грунта (PGA), пиковых горизонтальных, вертикальных и эффективных ускорений (PHA , PVA и $a_{эфф}$), длительностей ($\tau_{0,3}$, $\tau_{0,5}$), периодов (T_a) для выделенных на территории РСО-Алания зон с разными возможными интенсивностями сотрясений (I). PGA , PHA , PVA , $a_{эфф}$ – в см/с^2 ; $\tau_{0,5}$, $\tau_{0,3}$ и T_a – в с. / Recommended values of peak ground acceleration (PGA), peak horizontal, vertical and effective accelerations (PHA , PVA and a_{eff}), durations ($\tau_{0,3}$, $\tau_{0,5}$), periods (T_a) for the zones allocated on the territory of RNO-Alania with different possible intensities of vibration (I). PGA , PHA , PVA , a_{eff} are measured in cm/s^2 ; $\tau_{0,5}$, $\tau_{0,3}$ and T_a – in s.

$T, \text{с} / T, \text{s}$	Зоны с $I=7$ баллов MSK / Zones with $I=7$ points MSK		Зоны с $I=8$ баллов MSK / Zones with $I=8$ points MSK						Зоны с $I=9$ баллов MSK / Zones with $I=9$ points MSK	
	$t=500-1000$ лет / $t=500-1000$ years		$t=500$ лет / $t=500$ years		$t=1000-2500$ лет / $t=1000-2500$ years		$t=5000$ лет / $t=5000$ years		$t=2500-5000$ лет / $t=2500-5000$ years	
	Гориз-комп. / Horizontal components	Верт. комп. / Vertical components	Гориз-комп. / Horizontal components	Верт. комп. / Vertical components	Гориз-комп. / Horizontal components	Верт. комп. / Vertical components	Гориз-комп. / Horizontal components	Верт. комп. / Vertical components	Гориз-комп. / Horizontal components	Верт. комп. / Vertical components
PGA	133	-	192	-	267	-	368	-	533	-
PHA	155	-	223	-	310	-	428	-	620	-
PVA	-	100	-	144	-	200	-	276	-	400
$a_{эфф}$	100	-	144	-	200	-	276	-	400	-
$\tau_{0,3}$	4,7	4,7	5,8	5,8	6,5	6,5	7,4	7,4	8,1	8,1
$\tau_{0,5}$	2,8	2,8	3,4	3,4	3,8	3,8	4,4	4,4	4,8	4,8
T_a	0,34	0,34	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,42	0,42



a



b

Рис. 5. Примеры горизонтальных составляющих трехкомпонентных акселерограмм, рассчитанных для землетрясений с $t=1000-2500$ лет в выделенных на территории РСО-Алания зонах с $I=8$ баллов MSK. a и b – полученные методом искусственной генерации и методом подбора и масштабирования записей реальных землетрясений, соответственно /

Fig. 5. Examples of horizontal components of three-component accelerograms calculated for earthquakes with $t = 1000-2500$ years in the zones identified in the territory of RNO-Alania with $I = 8$ MSK points. a and b are accelerograms obtained by the method of artificial generation and by trail-and-error method and scaling of real earthquakes records, respectively

построения этих акселерограмм подробно описаны в [Салганик, 1987; Чернов Ю. и др., 2020]. Примеры прогнозных акселерограмм приведены на рисунке 5.

О качестве разработанных акселерограмм можно судить по высокому уровню соответствия измеренных по этим акселерограммам параметров колебаний (таблица 3) прогнозным характеристикам из таблицы 2. Такое же хорошее соответствие показывает и сравнение спектров реакции, рассчитанных по разработанным акселерограммам и прогнозных спектров реакции (рис. 4б), примеры которого приведены на рисунке 6.

Таким образом, оценки всех прогнозируемых параметров, полученные в процессе настоящего исследования – пиковых амплитуд, периодов, длительностей, спектров и акселерограмм ускорений колебаний грунта хорошо согласуются между

Таблица 3 / Table 3

Параметры колебаний грунта, измеренные по всем входящим в разработанный ансамбль акселерограмм, рекомендованном для выделенных на территории РСО-Алания зон с $I=8$ баллов MSK при землетрясениях с разными периодами повторяемости (t): без скобок – средние по массивам, в скобках – диапазон индивидуальных значений / Parameters of ground vibrations, measured according to all accelerograms included to the developed ensemble, recommended for the zones with $I = 8$ MSK points allocated in the territory of RNO-Alania for earthquakes with different return periods (t): values without brackets are average for the arrays, values in brackets denote the range of individual values

Зоны балльности / Intensity zones	t , лет / t , years	Параметры акселерограмм / Accelerogram parameters			
		$PGA (PHA) *$, см/с ² / $PGA (PHA) *$, cm/s ²	T_a , с / T_a , s	$\tau_{0,3}$, с / $\tau_{0,3}$, s	$\tau_{0,5}$, с / $\tau_{0,5}$, s
Горизонтальные компоненты акселерограмм / Horizontal components of accelerograms					
7 MSK	500-1000	135 (112-162)	0,35 (0,16-0,50)	4,8 (3,0-7,3)	2,8 (2,0-3,8)
8 MSK	500	198 (144-315)	0,38 (0,21-0,81)	4,9 (2,5-9,2)	3,2 (1,8-6,2)
	1000-2500	276 (200-437)	0,38 (0,23-0,88)	5,6 (2,5-11,4)	3,7 (1,8-7,7)
	5000	380 (276-603)	0,41 (0,24-0,84)	7,2 (4,3-10,1)	4,7 (2,8-8,7)
9 MSK	2500-5000	524 (375-758)	0,4290,22-0,66)	7,5 (4,5-15,5)	4,3 (3,1-6.1)
Вертикальные компоненты акселерограмм / Vertical components of accelerograms					
7 MSK	500-1000	105 (98-126)	0,33 (0,20-0,60)	5,0 (2,8-8,0)	2,9 (2,1-4,0)
8 MSK	500	162 (125-212)	0,36 (0,28-0,60)	5,1 (2,9-9,1)	3,7 (2,0-8,7)
	1000-2500	225 (174-295)	0,36 (0,31-0,60)	5,5 (2,9-9,5)	3,8 (2.2-8,0)
	5000	311 (240-407)	0,39 (0,29-0,60)	5,7 (2,9-11,1)	3,7 (2,0-8,7)
9 MSK	2500-5000	448 (376-537)	0,40 (0,28-0,8)	7,2 (5,0-14,5)	4,4 (3,5-7,8)

*PGA и PHA – оценки для горизонтальных и вертикальных компонент акселерограмм, соответственно. / *PGA and PHA are assessments for horizontal and vertical components of accelerograms, respectively.

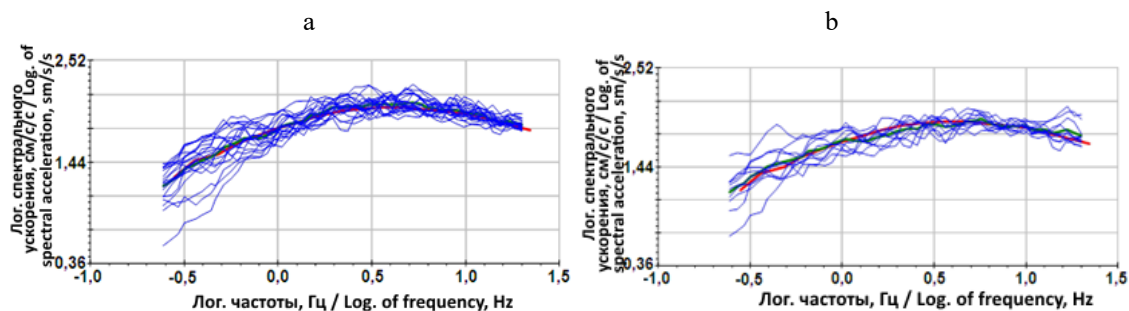


Рис. 6. Сопоставление прогнозных спектров реакции (красный цвет) и спектров, рассчитанных по синтезированным и реальным масштабированным акселерограммам землетрясений с $t=1000-2500$ лет, для выделенных на территории РСО-Алания зон с $I=8$ баллов MSK. Синий цвет – индивидуальные значения; зеленый цвет – средний по массиву. Индексы а и b обозначают горизонтальные и вертикальные компоненты записи, соответственно /

Fig. 6. Comparison of the predicted response spectra (red) and the spectra calculated according to the synthesized and real scaled earthquake accelerograms with $t = 1000-2500$ years for the zones with $I = 8$ MSK points allocated on the territory of RNO-Alania. Blue color denotes individual values; green color – average for the array. Indices a and b denote the horizontal and vertical components of the record, respectively

собой и не противоречат другим известным данным по изучаемому району и другим сейсмоактивным районам. Поэтому они могут быть рекомендованы для использования в дальнейших исследованиях и в практических целях.

Исходя из общих соображений по практическому использованию прогнозных акселерограмм и в соответствии с рекомендациями из [Штейнберг и др., 1993] можно сказать, что для достижения необходимой точности, расчет реакции конструкций целесообразно производить по каждой из рекомендуемого для данного случая набора акселерограмм с последующим усреднением всех индивидуальных определений реакций по каждой акселерограмме. Эти оценки и будут являться прогнозируемыми наиболее вероятными реакциями данных систем (конструкций) на расчетные сейсмические воздействия.

Заключение

Поводя итог можно сказать, что проведенные исследования позволили в значительной мере уточнить и расширить известные по предыдущим работам оценки вероятных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. При этом впервые для данного района на основании единого методического подхода с использованием однотипных расчетных схем получены полноценные и согласованные вероятностные оценки большинства из используемых в инженерно-сейсмологической практике характеристик возможных сейсмических воздействий. Прежде всего, это относится к оценкам макросейсмических интенсивностей сотрясений, пиковых амплитуд и спектров ускорений колебаний грунта, а также других количественных (физических) параметров колебаний грунта, ожидаемых в выделенных на изучаемой территории зонах с различными вероятными интенсивностями (балльностями) сотрясений. При этом важными как в региональном, так и в более общем плане представляются результаты, свидетельствующие о том, что вероятностные уровни спектров и амплитуд ускорений колебаний грунта в пределах одной и той же зоны балльности могут различаться в зависимости от среднего периода повторяемости прогнозируемых землетрясений. При этом степень этих различий может быть неодинакова в зонах с разны-

ми прогнозируемыми балльностями сотрясений. Так, если в выделенных на изучаемой территории зонах с сейсмичностью 7 баллов *MSK* и в зонах с сейсмичностью 9 баллов *MSK* выявленные различия по уровню этих параметров не превышают 8-9%, то в зонах с сейсмичностью 8 баллов *MSK* эти различия достигают 100%. В настоящее время в отечественных нормативных документах это никак не регламентируется. Второе важное обстоятельство – отличия полученных в настоящем исследовании прогнозных спектров реакции от стандартных спектров, рекомендуемых для данной территории строительными нормативами. Здесь так же, как и в предыдущем случае, эти отличия зависят от периодов повторяемости прогнозируемых землетрясений. Кроме того, эти различия зависят от частот спектральных составляющих. Так если на высоких частотах спектры настоящего исследования могут давать более высокие (до 80%) значения спектральных ускорений, то на низких частотах (менее 1 Гц) они наоборот могут быть до 100% ниже стандартных. Эти различия могут оказывать существенное влияние на качество расчетов на сейсмостойкость, например, протяженных или высотных объектов.

Выводы

1. Разработанные и использованные в настоящих исследованиях новые методические подходы позволили получить более точные и детальные оценки возможных на территории РСО-Алания сейсмических воздействий – макросейсмических интенсивностей сотрясений, пиковых амплитуд, периодов, длительностей и спектров ускорений колебаний грунта, а также акселерограмм при землетрясениях со средними периодами повторяемости $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет.

2. Полученные новые данные о вероятных сейсмических воздействиях на территории РСО-Алания показывают, что связанные с амплитудными уровнями прогнозируемые характеристики колебаний грунта могут существенно (до 100%) различаться в пределах одной и той же зоны балльности в зависимости от периодов повторяемости ожидаемых землетрясений.

3. Прогнозируемые на территории РСО-Алания уровни вероятных спектров реакции ускорений колебаний грунта, в зависимости от частот спектральных составляющих могут существенно (до 100%) отличаться от нормативных спектров, как в большую, так и в меньшую стороны.

4. Полученные новые данные свидетельствуют о том, что рекомендуемые для территории РСО-Алания нормативные оценки возможных сейсмических воздействий могут содержать неточности и поэтому нуждаются в дополнительных уточнениях и детализациях, особенно по отношению к проектированию ответственных и уникальных объектов.

5. В дальнейшем исследования по детальным оценкам сейсмической опасности целесообразно продолжить и в других районах Северного Кавказа.

Литература

1. Ванмарке Э. Х. Реакция сооружений на землетрясения. // В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. – М.: Недра, 1981. – С. 256-299.
2. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 349 с.
3. Заалишвили В. Б., Дзеранов Б. В., Габараев А. Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт. // Геология и геофизика Юга России. – 2011. – № 1. – С. 48-58.

4. Завьялов А. Д., Перетокин С. А., Данилова Т. И., Медведева Н. С., Акатова К. Н. Общее сейсмическое районирование от карт ОСР-97 к ОСР-2016 и картам нового поколения в параметрах физических характеристик. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 46. № 4. – С. 47-68.
5. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. Министерство науки и технологий, Российская Академия наук, Объединенный Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – М. – 1999. – 57 с.
6. Салганик М. П. О моделировании сейсмических воздействий на строительные сооружения. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1987. – Вып. 28. – С. 157-173.
7. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Отв. ред. В. И. Бунэ, Г. П. Горшков. – М.: Наука, 1980. – 307 с.
8. Соколов В. Ю. Оценка вероятных спектров колебаний грунта и спектров реакции с учетом локальных грунтовых условий. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1991. – Вып. 32. – С. 137-147.
9. Уломов В. И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсмобезопасность России». // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2012. – Т. 39. № 1. – С. 5-38.
10. Чернов Ю. К., Заалишвили В. Б., Дзеранов Б. В. Модели сейсмичности для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 4. – С. 162-178.
11. Чернов Ю. К., Заалишвили В. Б., Чернов А. Ю. Моделирование сильных движений грунта для прогнозирования вероятных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. // Физика Земли. – 2020. – № 5. 2020. – С. 46-58.
12. Штейнберг В. В., Сакс М. В., Аптикаев Ф. Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1993. – Вып. 34. – С. 5-94.
13. Akkar S, Sandikkaya M. A, Bommer J. J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // Bull Earthq. Eng. – 2014. – Vol. 12 (1). – pp. 359-387. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9461-4>.
14. Atkinson G. M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. // BSSA. – 2000. – Vol. 90. No. 2. – pp. 533-544.
15. Balassanian S., Ashirov T, Cheligze T. et al. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area. // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. – 1999. – Vol. 42. No. 6. – pp. 1139-1152.
16. Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al. Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. // J Seismol. – 2012. – Vol. 16. – pp. 451-473. DOI: 10.1007/s10950-012-9281-z
17. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. // Earthquake Spectra. – 2017. – Vol. 33. No. 3. – pp. 837-856. DOI: 33 (3):837-856.
18. Ulomov V. I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia. // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. – 1999. – Vol. 42. No. 6. – pp. 1023-1038.
19. Zaalishvili V. B., Chernov Yu. K. Methodology of Detailed Assessment of the Seismic Hazard of the Republic of North Ossetia-Alania. // The Open Construction and Building Technology Journal. – 2018. – No. 12. – pp. 309-318.
20. Zhang P., Yang Z., Gupta H. K., Bhatia S. C., Shedlock K. M. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) in continental Asia. // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. // Annali di Geofisica. – 1999. – Vol. 42. No. 6. – pp. 1167-1190.

References

1. Vanmarke E. H. The response of structures to earthquakes. In: Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra, 1981. pp. 256-299. (In Russ.)

2. Zaalishvili V.B. Seismic microzonation of cities, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka, 2009. 349 p. (In Russ.)
3. Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. Assessment of seismic hazard of the territory and construction of probabilistic maps. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2011. No. 1. pp. 48-58. (In Russ.)
4. Zavyalov A.D., Peretokin S.A., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Akatova K.N. General seismic zoning from GSZ-97 maps to GSZ-2016 and new generation maps in the parameters of physical characteristics. *Questions of engineering seismology*. 2018. Vol. 46. No. 4. pp. 47-68. (In Russ.)
5. A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-97. Explanatory note and a list of cities and towns located in earthquake-prone areas. Ministry of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, Joint Institute of Physics of the Earth named after O. Yu. Schmidt. Moscow. 1999. 57 p. (In Russ.)
6. Salganik M.P. On the modeling of seismic impacts on building structures. *Questions of engineering seismology*. 1987. Issue 28. pp. 157-173.
7. Seismic zoning of the territory of the USSR. Methodological foundations and regional description of the 1978 map. editors V.I. Bune, G.P. Gorshkov. Moscow. Nauka, 1980. 307 p. (In Russ.)
8. Sokolov V. Yu. Assessment of probable ground motion spectra and response spectra taking into account local ground conditions. *Questions of engineering seismology*. 1991. Issue 32. pp. 137-147. (In Russ.)
9. Ulomov V.I. Updating the normative seismic zoning as part of the unified information system "Seismic Safety of Russia". *Questions of engineering seismology*. 2012. Vol. 39. No. 1. pp. 5-38. (In Russ.)
10. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V. Seismicity models for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018. No. 4. pp. 162-178. (In Russ.)
11. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A. Yu. Modeling of strong ground movements for predicting probable seismic effects in the territory of North Ossetia-Alania. *Physics of the Solid Earth*. 2020. No. 5. 2020. pp. 46-58. (In Russ.)
12. Steinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods for assessing seismic effects (manual). *Questions of engineering seismology*. 1993. Issue 34. pp. 5-94. (In Russ.)
13. Akkar S, Sandikkaya M. A, Bommer J. J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bull Earthq. Eng.* 2014. Vol. 12 (1). pp. 359-387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.
14. Atkinson G. M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. BSSA. 2000. Vol. 90. No. 2. pp. 533-544.
15. Balassanian S., Ashirov T, Cheligze T. et al. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. *Annali di Geofisica*. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1139-1152.
16. Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al. Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. *J Seismol*. 2012. Vol. 16. pp. 451-473. DOI: 10.1007/s10950-012-9281-z
17. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. *Earthquake Spectra*. 2017. Vol. 33. No. 3. pp. 837-856. DOI: 10.1007/s10950-012-9281-z
18. Ulomov V.I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. *Annali di Geofisica*. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1023-1038.
19. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of Detailed Assessment of the Seismic Hazard of the Republic of North Ossetia-Alania. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2018. No. 12. pp. 309-318.
20. Zhang P., Yang Z., Gupta H. K., Bhatia S. C., Shedlock K. M. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) in continental Asia. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. *Annali di Geofisica*. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1167-1190.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 550.8.055

DOI: 10.46698/VNC. 2021.13.51.008

Оригинальная статья

Методика локального улучшения суммирования ОСТ для повышения прослеживаемости отдельных отражающих горизонтов

А. А. Дробинский , О. А. Жуковская 

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

Статья поступила: 16.04.2021, доработана: 12.05.2021, одобрена в печать: 20.05.2021

Резюме: Актуальность работы. В последние годы всё больше объектов сейсморазведочных работ относится к проблемным территориям, характеризующимся неблагоприятными поверхностными условиями и сложной геологической обстановкой. Получение качественных сейсмических изображений при обработке в таких случаях входит в число приоритетных направлений современной сейсморазведки. Одним из путей решения проблем ухудшения прослеживаемости сейсмических горизонтов в сложных условиях является оптимизированное суммирование общей средней точки (ОСТ), учитывающее качество входных сейсмических данных. **Цель исследования.** Настоящая работа посвящена созданию и тестированию гибкой, универсальной методики оптимизации суммирования ОСТ на конечной стадии полевой или камеральной обработки сейсмических данных метода отражённых волн общей глубинной точки (МОВ-ОГТ 2D/3D) для улучшения прослеживаемости отражающих горизонтов. При создании такой методики важным требованием являлась возможность реализации в существующем программном обеспечении (ПО), в том числе, отечественном. **Методы исследования.** Для исследования влияния сложных геологических объектов на распределение энергии в выборках ОСТ было выполнено построение иллюминационной модели по целевому горизонту, расположенному под эрозионным врезом. Оценка влияния рассеивающих аномалий верхней части разреза (ВЧР) проводилась с помощью двумерного лучевого моделирования с получением синтетических сейсмограмм ОПВ по горизонтально-слоистому модельному разрезу, содержащему участок палеокарста. Чтобы оценить потенциал применения предлагаемой методики были генерированы синтетические данные, содержащие сильные помехи различной природы, а также зону падения амплитуды полезного сигнала. По этим данным были разными способами получены и оценены суммарные трассы. Предлагаемая методика также была опробована на реальных данных метода общей глубинной точки (МОГТ-2D). Оценка результатов работы различных вариантов суммирования выполнялась визуально, а также количественно (с помощью атрибутного анализа). **Результаты работы.** Выполненное исследование показало недостаточную эффективность стандартного суммирования ОСТ для сложных сейсмических данных. Польза от применения существующих методик улучшения суммирования ОСТ очевидна, но они имеют недостатки: нарушение естественной динамики волновой картины, невозможность локального применения, необходимость реализации в специальном ПО. Предлагаемая авторами методика оптимизации суммирования даёт высокую гибкость и маневренность работы и позволяет справиться с вышеуказанными проблемами. Свободный выбор критериев взвешивания интервалов трасс на основе анализа пользовательского набора атрибутов открывает широкие возможности тонкой настройки процедуры, вводит интерпретационную составляющую в процесс оптимизации суммирования, делая его более осмысленным в геолого-геофизическом отношении. Предлагаемая методика не требует написания и опробования нового специального ПО и может быть реализована в уже имеющихся сейсмических пакетах, включая и российские программные комплексы.

Ключевые слова: сейсморазведка МОГТ, обработка, сигнал, помеха, суммирование, матрица, вес, прослеживаемость.

Для цитирования: Дробинский А. А., Жуковская О. А. Методика локального улучшения суммирования ОСТ для повышения прослеживаемости отдельных отражающих горизонтов. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.13.51.008.

GEOPHYSICAL METHODS

DOI: 10.46698/VNC. 2021.13.51.008

Original paper

Local CMP stacking improvement technique
for better traceability of separate reflection horizonA. A. Drobinskiy , O. A. Zhukovskaya Astrakhan State Technical University, 16 Tatischeva Str., Astrakhan 414056,
Russian Federation, e-mail: a. drobinskiy@yandex. ru

Received: 16.04.2021, revised: 12.05.2021, accepted: 20.05.2021

Abstract: Relevance. Today increasingly more objects of prospecting seismology belong to problem areas characterized by unfavorable surface conditions and complex geological situation. Acquiring of high-quality seismic images by processing in these cases is a part of priority directions of modern prospecting seismology. One of the way to overcome the problem of seismic horizon traceability worsening in hard conditions is optimized CMP stacking, considering the quality of input seismic data. **Aim.** This work is devoted to generation and examination of flexible universal technique of optimized stacking on the last stage of field or final processing of 2D/3D reflection seismic data for seismic horizon traceability improvement. Creating this technique assumed important condition of embodiment ability in existing software (including Russian). **Methods.** Illumination model building was performed for target horizon, located beneath the erosive cut for studying of complex geological objects influence on energy distribution in CMP gathers. Scattering superficial anomalies influence was estimated by means of 2D ray tracing and synthetic shot records generation on horizontally layered model section consisting near surface ancient karst spot. Synthetic data with different kinds of noise and signal amplitude decay zone was generated to appreciate implementation potential of introducing technique. Stacked traces were obtained and evaluated on this data with different methods. The introduced technique was tested on real 2D seismic data too. Evaluation of results of different kinds of stacking was performed by sight and with quantitative (attribute) analysis. **Results.** Performed research showed insufficient efficiency convenience CMP stacking for complex seismic data. The advantages of existing CMP stacking improvement methods are obvious but there are drawbacks too: natural wave field dynamic violation, disability of local implementation, need of special software development. Offered technique of stacking optimization gives high flexibility and mobility in work and allow overcoming the aforementioned problems. Easy choice of trace range weighting criteria based on customer attribute set analysis gives wide opportunities of fine-tuning for this procedure, bringing in interpretation term of stack optimization process and making it more sensible in geological-geophysical relation. This technique need not new software development and testing, it could be embodied in existing seismic software suites, including Russian complexes.

Keywords: exploration seismology, processing, signal, noise, stacking, matrix, weight, traceability.

For citation: Drobinskiy A. A., Zhukovskaya O. A. Local CMP stacking improvement technique for better traceability of separate reflection horizon. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.13.51.008.

Введение

Вопрос оптимизации суммирования при получении сейсмических разрезов по данным МОВ-ОГТ исследуется практически с самого времени появления метода общей глубинной точки. Работы в этом направлении известны как за рубежом, так и в нашей стране [Сагалова и др., 1970; Robinson, 1970]. Однако, стоит отметить, что в отечественной литературе оптимизации этого вида суммирования посвящено меньше внимания, особенно, в последние годы. Российские авторы в большей мере

сосредоточили свои усилия на вопросах улучшения вертикального суммирования накоплений при полевых работах с невзрывными источниками [Денисов, 2011; Череповский, Гафаров, 2013; Череповский, 2011]. Тем не менее, направление улучшения качества результирующих разрезов путём повышения эффективности работы процедуры суммирования ОСТ остаётся актуальным, и исследователи продолжают работать в этом направлении [Романов, 2015; Yadav et al., 2020].

Суммирование по более эффективным алгоритмам, позволяющим распознавать и учитывать качество подаваемых на его вход данных, может быть особенно востребованным в последние годы. Всё большее число объектов сейсморазведочных работ приходится на зоны сложных сейсмогеологических условий, фактические сроки работсокращаются, отмечается рост нестабильности климатических условий [Кузнецов и др., 2021; Левицкий и др., 2019]. При этом качество данных может существенно изменяться от одного физического наблюдения к другому, а сложности геологического строения, связанные с приповерхностными аномалиями или рассеивающими, поглощающими участками в самом разрезе, могут драматически ухудшать результирующую волновую картину в целевых интервалах вплоть до полной потери прослеживаемости [Козырев и др., 2003; Притчетт, 1999; Yilmaz, 2001]. Преодолеть связанные с этим проблемы может разработка и внедрение удобной и надёжной для промышленного применения методики рационализации суммирования ОСТ.

Цель исследования

Цель настоящего исследования состоит в создании и тестировании гибкой, универсальной методики оптимизации суммирования ОСТ на конечной стадии полевой или камеральной обработки сейсмических данных МОВ-ОГТ 2D/3D для улучшения прослеживаемости отражающих горизонтов.

Важным критерием универсальности можно считать возможность реализации методики практически в любом обрабатывающем комплексе, включая и отечественные разработки, без необходимости написания нового ПО и доведения его до стадии коммерческого продукта, т. к. последнее требует существенных временных и материальных затрат и значительно отдаляет найденное решение от его практического применения [Yilmaz, 2001].

Требование гибкости подразумевает возможность индивидуальной работы с отдельными интервалами разреза или отражающими горизонтами так, чтобы не вносить никаких изменений в окружающую волновую картину выше и ниже зоны применения или за пределами рабочего полигона в плане. Выполнение такого требования позволяет избежать часто возникающих при работе альтернативного алгоритма получения суммы сомнений в сохранении истинного соотношения амплитуд, гарантированно оставляя его неизменным во всех зонах за пределами обрабатываемого интервала [Денисов, 2011; Денисов и др., 2005; Иванов, 2011; Sanchis, Hanssen, 2011]. Для достижения максимальной эффективности также полезно иметь возможность сочетать несколько различных приёмов оптимизации суммирования в одном прогоне вычислений.

Обеспечение гибкости также подразумевает возможность мгновенного тестирования широкого набора критериев определения весов входных трасс с оценкой результата «на лету». Это, по сути, вводит интерпретационную составляющую в процесс оптимизации суммирования и делает его более осмысленным не только с математической, но и с геолого-геофизической точки зрения.

Методы исследования

С целью оценки проблемы формирования зон низкой прослеживаемости и возможности снизить их негативное влияние с помощью рационализации суммирования было выполнено построение иллюминационной модели. Для этого был выбран отражающий горизонт под искажающим объектом и произведено прогнозирование значений реальной кратности, учитывающее траектории лучей падающих и отражённых волн. Для оценки влияния рассеивающих аномалий в ВЧР было проведено двумерное лучевое моделирование по упрощённой модели горизонтально-слоистого разреза, содержащей приповерхностную аномалию карстовой природы. Построенная модель была использована для получения синтетических сейсмограмм общего пункта возбуждения, как с влиянием данной аномалии, так и без неё, выполнено визуальное сопоставление полученных результатов.

Чтобы оценить потенциал применения предлагаемой методики были генерированы синтетические данные, содержащие сильные помехи различной природы, а также зону падения амплитуды полезного сигнала. По синтетическим данным было выполнено суммирование по стандартным и оптимизированному алгоритмам, проведена качественная и количественная оценка результата. Предлагаемая методика также опробована на реальных данных МОГТ-2D.

Для присвоения весов при тестировании предлагаемой методики оптимизации суммирования производился атрибутный анализ: использовались базовые параметры (например, удаление), рассчитывался и оценивался набор специальных по-трассных сейсмических атрибутов, вычисляемых в домене общей средней точки. Тестировались стандартные атрибуты (включая оценки на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) и корреляционные. Также производилась визуальная оценка.

Для моделирования и генерации синтетических данных, их обработки и оценки использовались ПО Seis Space (Halliburton), Opend Tect (dGBEarthSciences), для оценки систем наблюдения и моделирования использовалось ПО Mesa (GMG). Сборка вычислительных заданий (потоков) по предлагаемой методике оптимизации суммирования, расчёт атрибутов для присвоения весов, визуализация и количественная оценка суммотрасс выполнялись в ПО Seis Space (Halliburton).

Результаты исследования и их обсуждение

Снижение соотношения сигнал-помеха в сложных сейсмогеологических условиях – хорошо известная проблема качества сейсмических данных. Многие исследования, связанные с рационализацией процесса суммирования, строятся на оценке данного параметра для сейсмических трасс при определении весов [Хаттон, 1989; Anderson, Mcmechan, 1990, 2006; Rietsch, 2006]. Его, несомненно, необходимо учитывать, как важный критерий, особенно, для улучшения качества суммирования в нижних интервалах разреза, где уровень амплитуд случайного шума на исходной записи может значительно превышать уровень амплитуд отражённых волн. Однако не менее важным фактором является практическое отсутствие сигнала отражённых волн на протяжённых интервалах трасс выборок общих глубинных точек (ОГТ) (иногда – более половины их количества) по причине физической невозможности его регистрации из-за эффектов поглощения и рассеяния энергии упругих колебаний [Притчетт, 1999].

На рисунке 1 приводятся результаты оценки негативного влияния объекта сложной конфигурации, расположенного над целевым горизонтом, на распределение кратности ОГТ по последнему с помощью иллюминационного моделирования. Эрозионный врез (палеоканьон с активным развитием трещиноватости и крутыми склонами) по кровле высокоскоростных карбонатных отложений, расположен над целевым горизонтом, залегающим на глубине примерно 1200 м. Искажающее влияние данного объекта на траекторию лучей приводит к существенному искажению лучевой траектории. В результате нарушение кратности ОГТ наблюдается в размере до 50% от проектной. Зонам максимального снижения кратности (до уровня 100 и ниже) будут соответствовать выборки ОСТ, до половины трасс которых не будет содержать полезного сигнала в целевом интервале. Миграционные преобразования позволяют улучшить это положение, но полностью компенсировать потерю энергии до суммирования не получится [Yilmaz, 2001; Sanchis, Hanssen, 2011; Zhou, 2014]. Ввиду того, что на реальных данных положение может быть ещё хуже по причине общего снижения уровня сигнала в нижней части разреза и низкого соотношения сигнал-шум, снижение кратности может привести к образованию участков слепых зон [Дробинский и др., 2020]. Преодолеть этот отрицательный эффект можно путём оптимизации суммирования, например, снизив вес для трасс в выборках ОСТ, на которых практически отсутствует полезный сигнал.

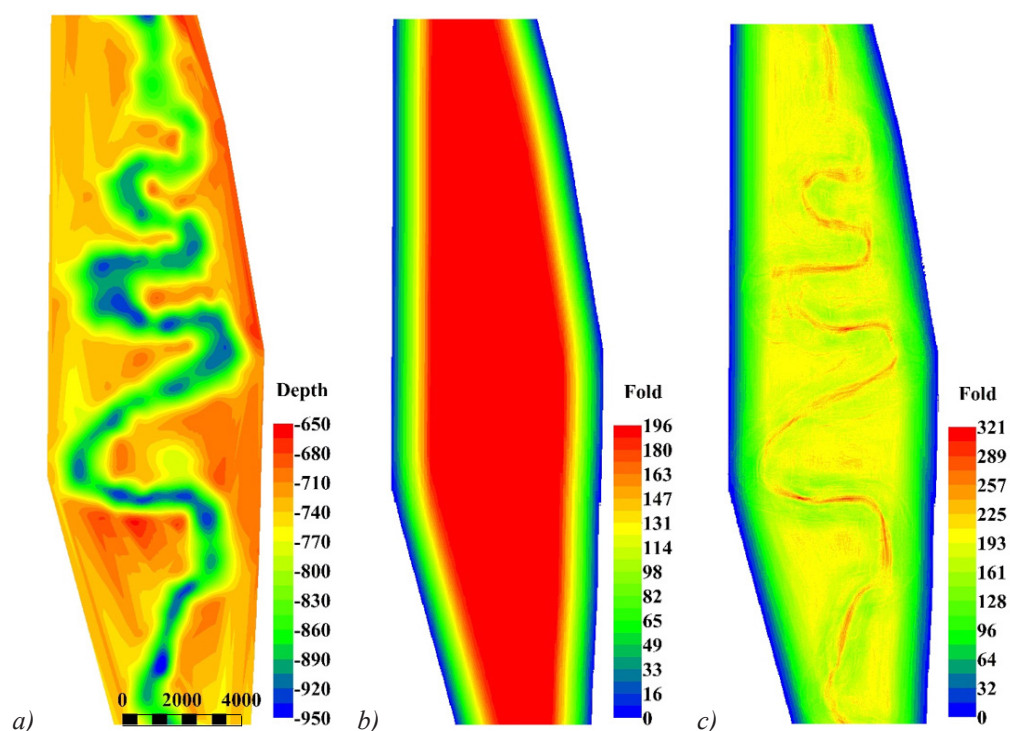


Рис. 1. Схема влияния эрозионного вреза неглубокого залегания на распределение кратности съёмки МОГТ-3D для нижележащего отражающего горизонта (шкалы: Depth – альтитуда горизонта в метрах, Fold – кратность): а – структурная схема эрозионного вреза; б – теоретическая кратность ОГТ для нижележащего горизонта (глубина 1200 м); с – фактическая кратность ОГТ для нижележащего горизонта по данным иллюминационного моделирования / Fig. 1. The sketch of superficial erosive cut influence on 3D seismic survey fold distribution for lower reflection horizon (color scales: Depth – horizon altitude (meters), Fold – CMP fold): а – outline of erosive cut structure; б – theoretical fold for lower horizon (depth 1200 m); с – fact fold for lower horizon according to illumination modeling

На рисунке 2 приводится горизонтально-слоистая модель осадочного терригенно-карбонатного разреза, в целом, достаточно благоприятная для исследований МОВ-ОГТ. Приповерхностный слой представлен супесями и суглинками (скорость продольных волн 1400 м/с). Коренные породы представлены карбонатами (скорость продольных волн 2400 м/с). Для оценки возможного негативного влияния геологических аномалий ВЧР на регистрируемое волновое поле на времени около 200 мс был введён проблемный участок – зона палеокарста протяжённостью около 150 м на границе двух вышеуказанных слоёв. Известно, что области развития приповерхностного карста могут приводить к образования протяжённых зон практически нулевого прослеживания на целом суммарном разрезе [Козырев и др., 2003; Притчетт, 1999; Yilmaz, 2001]. По рассматриваемой модели были получены синтетические сейсмограммы общего пункта возбуждения (активная расстановка: 161 пункт приёма (ПП) через 25 м, удаление 2000 м, запись до 2 с) для варианта с рассеивающим объектом и без него. Хорошо видно, что значительное число трасс на сейсмограмме с «точечным карстом» содержит сильно искажённый сигнал или же сигнал практически отсутствует. Возможность исключить эти части трасс (или снизить их вес)

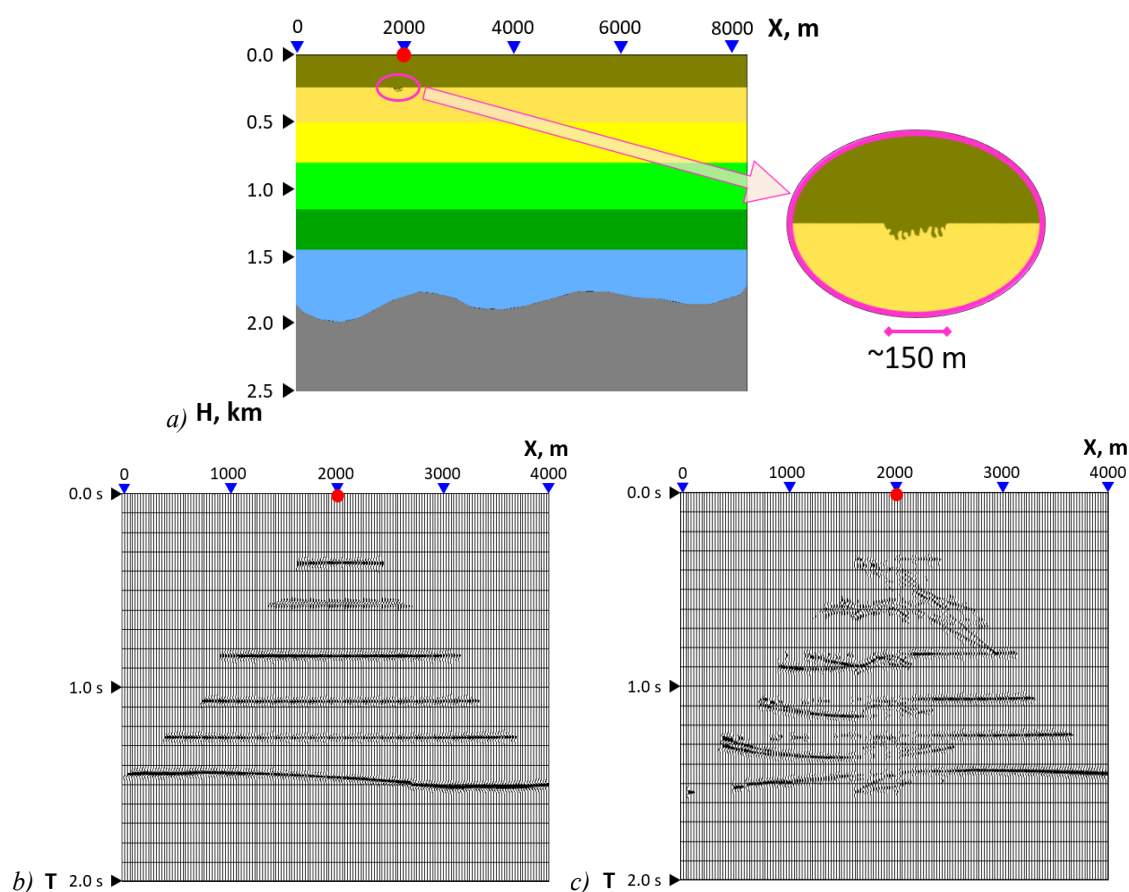


Рис. 2. Модель геологического разреза (а), использованная для лучевого моделирования, содержащая рассеивающий объект (локальный участок развития палеокарста) в ВЧР, и синтетические сейсмограммы ОПВ, полученные по ней (точкой показано положение источника упругих волн): б – без учёта рассеивающего объекта; в – с его учётом
 Fig. 2. Model of geological section was used for ray tracing (a), including scattering object (local ancient karst zone) in near surface zone, and synthetic common shot gathers, obtained with this model (source location is denoted by point): b – without scatterer; c – with scatterer

при суммировании позволит существенно улучшить прослеживаемость целевых горизонтов в подобных условиях.

Обзор существующих подходов к оптимизации суммирования. В существующих работах можно выделить два основных подхода к определению весов данных для оптимизации суммирования ОСТ: на основе оценки качества отдельных трасс (по соотношению сигнал/помеха, уровню шума, затуханию и т. п.) [Anderson, McMechan, 1990, 2006; Rietsch, 2006, Robinson, 1970] и на основе сходства каждой отдельной трассы с эталонной модельной трассой (в первую очередь, через ФВК) [Gimlin et al., 1986; Liu et al., 2009; Sanchis, Hanssen, 2011, Robinson, 1970]. Следует отметить, что часть исследователей сфокусировалось в большей мере на создании алгоритмов определения весов [Stefanou, Manolis, 2007; Tyapkin, Ursin, 2005; White, 2006; Yadav et al., 2020], другая – на разработке методик определения весов с использованием уже существующих подходов и алгоритмов [Liu et al., 2009; Sanchis, Hanssen, 2011].

Общими недостатками методов, основанных на оценке трассы целиком, является невозможность учёта изменения качества записи во времени. Трасса получает общий вес для всех принадлежащих ей дискретов. Это позволяет исключить плохие трассы, но не даёт возможности учесть влияние переменных по времени негативных факторов, например, ослабление сигнала по геологическим причинам в отдельных интервалах. Предлагаемые корреляционные методы требуют создания эталонной трассы для каждой выборки ОСТ и последующей локальной корреляции отдельных трасс с ней, что достаточно эффективно, но мало применимо в зонах с почти полной потерей прослеживаемости [Liu et al., 2009; Sanchis, Hanssen, 2011].

Существенным недостатком предлагаемых корреляционных методов является потеря соотношения амплитуд по латерали и вертикали или необходимость сглаживания по разрезу после применения, что также отрицательно сказывается на естественной динамике волновой картины, хотя по этому вопросу мнение исследователей неоднозначно [Денисов, 2011; Иванов, 2011; Sanchis, Hanssen, 2011]. Наиболее результативные корреляционные методики, к сожалению, не предусматривают возможности применения в узко заданном интервале, о чём упоминают и сами их разработчики, указывая на этот недостаток в качестве предмета для проработки в будущем [Sanchis, Hanssen, 2011].

Предлагаемая методика оптимизации суммирования и её применение. Предлагаемая авторами методика предусматривает как новый подход к определению весов, так и принципиально иную схему применения рационального суммирования по сравнению с ранее освещёнными в научных работах. В настоящее время при интерпретации сейсмических данных для динамического анализа как после, так и до суммирования активно и успешно применяется широкий набор сейсмических атрибутов. Если попытаться подобрать перечень атрибутов и оценить их распределение, связав его с уровнем и качеством сейсмического сигнала в заданном диапазоне данных, то можно взвесить данные в соответствии с результатами такой оценки. Трассы с низким уровнем оценки получают минимальные веса, с высоким – максимальные. Сложностью такого подхода является необходимость тестирования и оценки влияния на качество суммирования широкого набора параметров. С одной стороны, это требует дополнительных затрат труда и машинного времени, с другой – означает появление интерпретационной составляющей и возможности осознан-

но и обоснованно с точки зрения геолого-геофизического анализа оптимизировать процесс получения суммы.

В ходе исследования тестировался широкий набор «низкоуровневых» сейсмических атрибутов, обычно получаемых на стадии обработки, включающий более 50 параметров, среди которых наибольшую эффективность при оценке весов в процессе суммирования показали следующие: доминирующая частота, средняя максимальная общая амплитуда, средняя и максимальная общая энергия, сила отражения, смещение корреляционного максимума (от горизонта), относительная мера корреляции, коэффициент ковариации, корреляционные компоненты, среднее соотношение сигнал/помеха. Ввиду высокого разнообразия потенциально применимых атрибутов исследование их применения для рационализации суммирования продолжается авторами и, разумеется, может быть развито любыми заинтересованными геофизиками. Проводилось тестирование и базовых атрибутов, в первую очередь, геометрических, среди которых удаление, например, позволяет очень гибко управлять базой суммирования по отдельным горизонтам.

При разработке методики вычисления весов было заложено главное требование: возможность использовать широкий и гибко настраиваемый набор критериев оценки (а не 1-2, как в большинстве ранее проведённых работ). Результатом стали система поиска отклонения от нормального значения и принцип весового штрафа по отклонению. Система поиска отклонения состоит в самом простом случае в поиске «нормального» (медианного, среднего или усечённого среднего) значения оцениваемого параметра по всем трассам выборки ОСТ. Далее из значения параметра для каждой трассы вычитается найденное нормальное значение, разница берётся по модулю (необязательно) и делится на нормальное значение, в результате чего получается относительное значение отклонения. В зависимости от значения отклонения, вес интервала трассы получает штраф. Например, штраф 25% означает умножение входного веса на 0,75; штрафы 10, 15, 20% по трём параметрам дадут коэффициент снижения веса, являющийся произведением 0,9; 0,85 и 0,8, т.е. 0,612. Принципиальный граф специальной обработки для этой цели показан на рисунке 3.

Задача интерпретации входных параметров и выходных результатов сводится к подбору ключевых триггеров (атрибутов) для снижения весов, определения адекватных диапазонов отклонений и соответствующих им штрафов. Для решения ряда противоречий и сложно увязываемых требований к процессу оптимизации суммирования был разработан подход раздельной обработки данных и коэффициентов их взвешивания путём генерации и модификации сейсмограммы-матрицы единичных весов.

Принцип такого подхода достаточно прост: на основе реальных данных создаётся полностью идентичный по геометрии, количеству трассы отсчётов набор, но значения всех его дискретов принимаются равными 1, зона мьютинга обнуляется. Если прогнать данные по показанному выше графу без каких-либо модификаций единичной сейсмограммы-матрицы весов, то на выходе будет получен обычный суммарный разрез, без каких-либо изменений волновой картины. Модификация любого выбранного участка сейсмограммы-матрицы позволяет управлять весами данных перед суммированием сколь угодно гибко. Это даёт ряд преимуществ:

1. Работа с отдельным интервалом или отражающим горизонтом, без внесения каких-либо изменений в динамику волновой картины остальной части разреза.

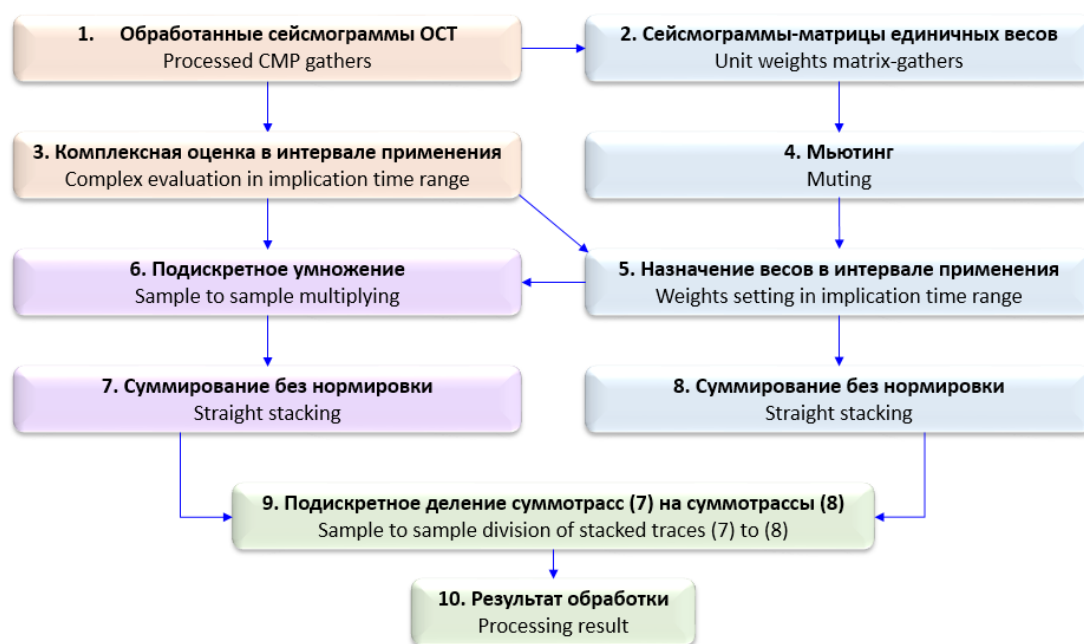


Рис. 3. Блок-схема принципиального графа специальной обработки для проведения оптимизированного суммирования (последовательность – в порядке возрастания номера, стрелками показано движение входных/выходных данных) /

Fig. 3. The chart of special processing sequence for optimized stacking (execution order match with the number, input/output data flows is marked by arrows)

2. Можно комбинировать сразу несколько методик оптимизации суммирования, применяя их к одной и той же матрице весов, например, снизив вес трасс меньших удалений в нижней части разреза для лучшего подавления кратных волн и также применить оптимизацию суммирования по атрибутам в нужных интервалах.

3. Индивидуальное управление базой суммирования для отдельных горизонтов на основе изучения наборов прогрессивного мьютинга.

4. Контроль изменения динамики интервала применения путём сравнения с остальной волновой картиной на том же самом разрезе (т.е. с областями, где методика не применялась).

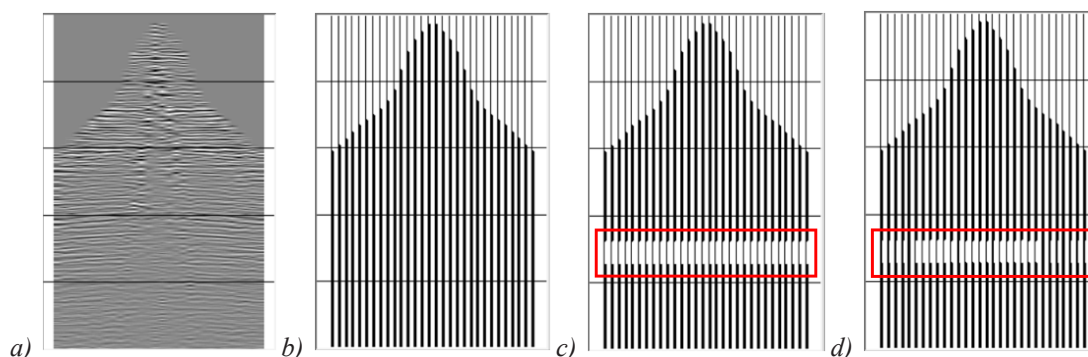


Рис. 4. Схема построения весовой матрицы для оптимизации суммирования на основе исходной сейсмограммы ОСТ: а – исходная сейсмограмма; б – сейсмограмма-матрица единичных весов; в – обнуление весов в целевом интервале; д – назначение весов в финальной сейсмограмме-матрице весов /

Fig. 4. The sketch of weight matrix building based on initial CMP gather: a – initial gather; b – unit weights matrix gather; c – weights zeroing in target range; d – final matrix gather weights assignment

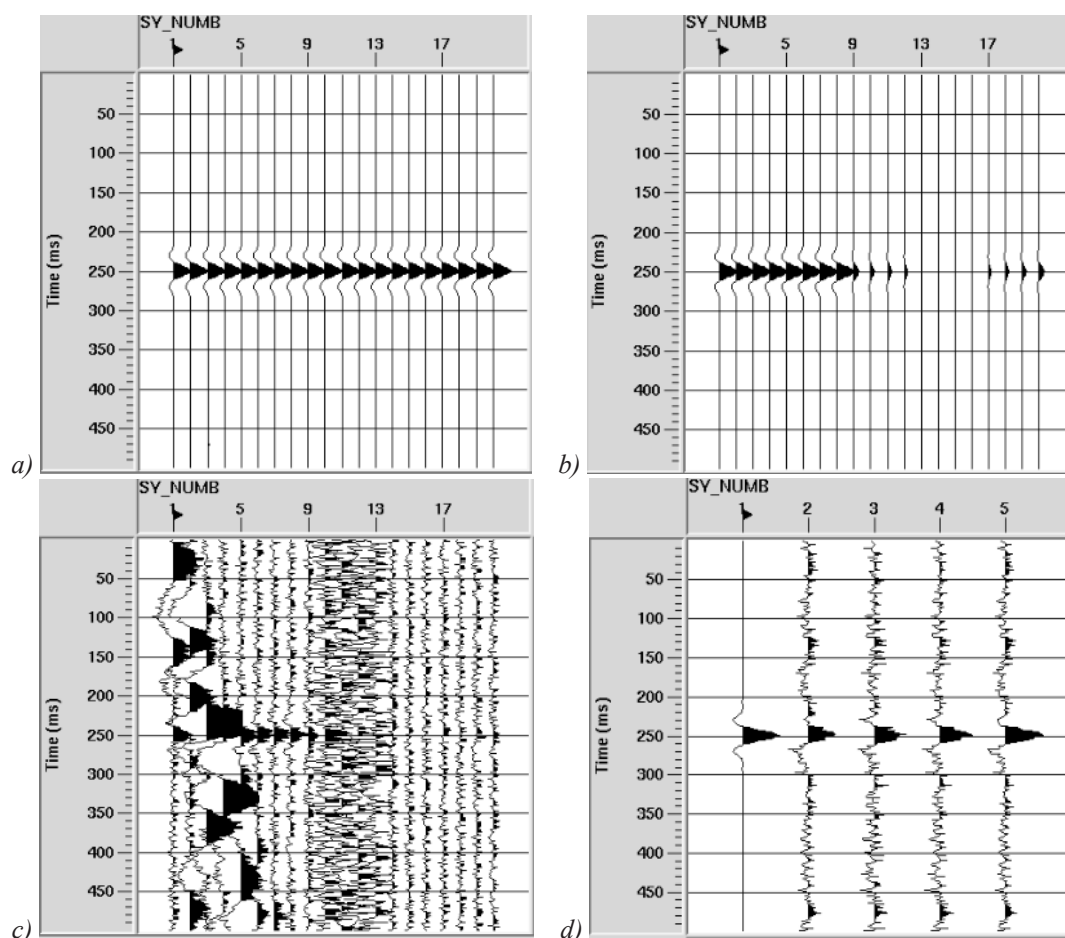


Рис. 5. Результаты тестирования различных методик суммирования ОСТ на синтетических данных: а – трассы с синтетическим сигналом Ормсби (введены кинематические поправки); б – трассы (а) с вводом зоны ослабления сигнала; в – трассы (б) с добавлением помех; д – суммотрассы, полученные: 1 – по (б) стандартным суммированием, 2 – по (в) стандартным суммированием, 3 – по (в) медианным суммированием, 4 – по (в) по усечённому среднему; 5 – по набору (в) оптимизированным суммированием

Fig. 5. The results of different CMP stacking methods examination on synthetic data: a – traces with synthetic Ormsby impulse (NMO'ed); b – traces (a) with zone of signal decay; c – traces (b) with addition of different noise; d – stacked traces, obtained: 1 – with (b) by conventional stacking, 2 – with (c) by conventional stacking, 3 – with (c) by median stacking, 4 – with (c) by alpha-trim mean, 5 – with (c) by optimized stacking

5. Вспомогательные «технические» процедуры, работа которых зависит от амплитуд, например, сглаживание ступени интервала применения, не нужно проводить по исходным данным. Их достаточно применить к матрице весов в целевом интервале. Это также защищает данные от искажений амплитуд по латерали и по времени.

6. Вес получают лишь интервалы трасс (сколь угодно узкие), нет необходимости определять вес для всей трассы целиком.

На рисунке 4 показаны стадии формирования финальной матрицы весов, соответствующей процедуре 5 графа специальной обработки, показанного на рисунке 3.

Для оценки возможностей предлагаемой методики оптимизации суммирования ОСТ были сгенерированы синтетические данные, имитирующие одиночное отражение на 20-кратной выборке ОСТ (рис. 5). Набор получен с импульсом Ормсби 4-8-

30-40 Гц длительностью 100 мс, кинематика введена. Для создания волновой картины, соответствующей регистрации в сложных геолого-геофизических условиях, в набор была введена зона ослабления сигнала (рис. 5б), добавлены поверхностная волна (5 составляющих), повышенный уровень случайного шума, область сильно шумящих каналов (каналы 10-13). По набору, представленному на рисунке 5б, была получена эталонная трасса, с которой можно сравнить суммотрассы медианного, по усечённому среднему (уровень 50%) и оптимизированного суммирования (рис. 5г).

Визуальная оценка показывает, что стандартное суммирование по среднему даёт самый слабый результат, медианное – демонстрирует улучшение, суммирование по усечённому среднему показывает самую качественную суммотрассу из стандартных методов. Применение методики оптимизации суммирования позволяет поднять уровень сигнала на уровень выше эталонной трассы за счёт снижения веса трасс с ослаблением сигнала (каналы 8-20). Форма сигнала для последнего варианта, как и видимая частота, оказались наилучшими.

В таблице 1 приводятся количественные (атрибутивные) оценки, сделанные по суммотрассам, показанным на рисунке 5 г. Количественные оценки, в целом, совпадают с визуальными: более высокие показатели из стандартных методов, как по

Таблица 1 / Table 1

Результаты количественной (атрибутивной) оценки различных вариантов суммирования ОСТ, выполненных по синтетическим данным (номер варианта суммирования соответствует номеру трассы на рисунке 1д) / The results of quantitative (attribute) evaluation of different CMP stacking techniques, performed on synthetic data (stacking version number match the number on fig. 1d)

<i>Вариант суммирования / Summary variant</i>	<i>Average Energy</i>	<i>Total Amplitude</i>	<i>Average Energy</i>	<i>Average Reflect Strength</i>	<i>Signal/ Noise</i>	<i>Dominant Frequency</i>
1 – Суммирование по среднему без помех / Summation over a noise-free mean	0,6	7,0	0,6	1,0	-	30,0
2 – Суммирование по среднему / Summation over a mean	0,4	5,3	0,4	0,8	4,5	28,2
3 – Медианное суммирование / Median summation	0,5	5,6	0,5	0,9	5,0	27,6
4 – Суммирование по усечённому среднему / Summation over a trimmed mean	0,5	5,7	0,5	0,9	5,8	28,7
5 – Суммирование с оптимизацией / Summation with an optimization	0,7	8,2	0,7	1,1	7,2	29,6

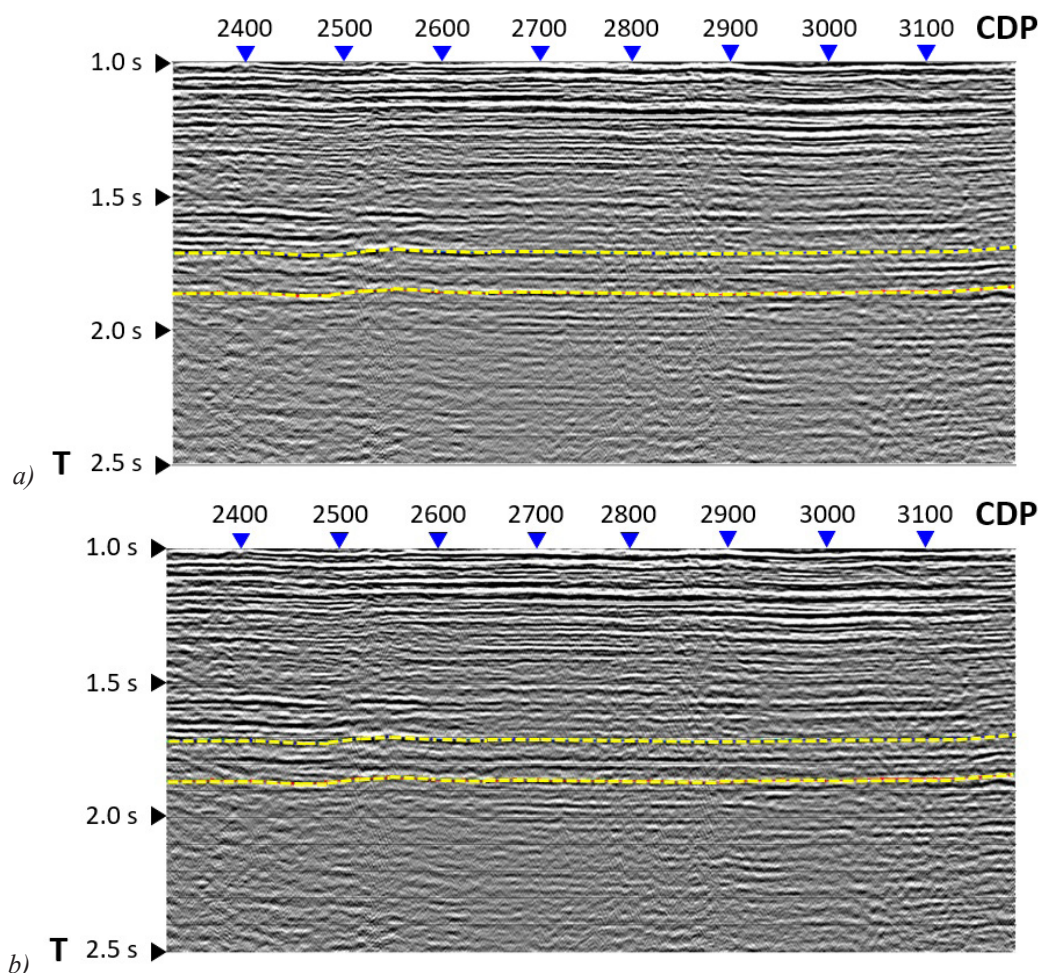


Рис. 6. Фрагмент сейсмического разреза, полученного: а – со стандартным суммированием ОСТ; б – с оптимизированным суммированием ОСТ; оптимизация сделана по горизонту на времени $\sim 1,8$ с /
Fig. 6. The part of seismic section, obtained with: a – conventional CMP stacking; b – optimized CMP stacking; optimization performed on ~ 1.8 s horizon

энергии, так и по частоте, характерны для суммирования по медиане и по усечённому среднему. Наилучшими показателями характеризуется суммотрасса 5, полученная с оптимизацией суммирования. Её энергетические показатели даже превышают эталонные значения, из-за учёта зоны падения уровня сигнала.

Для опробования предлагаемой методики на реальных данных был выбран сейсмический профиль, полученный в сложных условиях в северной части Прикаспийской впадины. Обработка проведена с минимальным применением процедур шумоподавления и с сохранением соотношения амплитуд. Оптимизированное суммирование по предлагаемой методике применялось к временному интервалу, соответствующему отражающему горизонту с нарушением прослеживаемости. Фрагмент суммарной волновой картины, полученный по стандартной и оптимизированной методикам суммирования, представлен на рисунке 6.

Можно отметить, что оптимизированное суммирование позволило улучшить прослеживаемость горизонта и получить непрерывную устойчивую ось синфазности по верхнему положительному максимуму в промежутке ОГТ 2500-3200. Осложнения волновой картины в области ОГТ 2500 (разрывное нарушение) и в интервале ОГТ 2300-2500 также стали видны значительно отчётливее и контрастнее.

Динамика и рисунок отражений выше и ниже интервала применения не изменились. Количественная оценка показала увеличение соотношения сигнал-помеха в 1,87 раза, силы отражений (reflection strength) в 1,33 раза для последнего варианта обработки (рис. 6б).

Выводы

Проведённое исследование показало, что стандартное суммирование ОСТ, выполняемое по данным МОВ-ОГТ, полученным в сложных сейсмогеологических условиях, может быть недостаточно эффективно, особенно, в зонах потери сигнала на части трасс из-за влияния приповерхностных или глубинных объектов, искажающих и рассеивающих энергию упругих сейсмических колебаний.

Некоторые из существующие методов оптимизации суммирования дают существенное улучшение волновой картины, вплоть до появления ранее не различимых отражений, но имеют ряд проблем: нарушение соотношения динамики, невозможность применения поинтервалам, учёт малого числа параметров для назначения весов, невозможность комбинирования нескольких алгоритмов.

Предлагаемая авторами методика оптимизации суммирования даёт высокую гибкость и маневренность работы и позволяет справиться с вышеуказанными недостатками. Свободный выбор критериев взвешивания интервалов трасс на основе анализа пользовательского набора атрибутов открывает широкие возможности тонкой настройки процедуры, вводит интерпретационную составляющую в процесс оптимизации суммирования, делая его более осмысленным в геолого-геофизическом отношении. Проведённые тесты на синтетических и реальных данных подтверждают качественное и количественное улучшение волновой картины в результате оптимизации суммирования.

Важным достоинством методики является то, что она не требует написания и опробования нового специального ПО, а может быть реализована в имеющихся сейсмических программных пакетах, включая отечественные, что позволяет заинтересованным геофизикам приступить к её тестированию и применению практически сразу после изучения.

Литература

1. Денисов М. С. О выборе весов при суммировании сейсмических трасс. Комментарий к статье А. В. Череповского. // Геофизика. – 2011. – № 1. – С. 22-26.
2. Денисов М. С., Фиников Д. Б. Способ подавления шумов дискретизации при суммировании сейсмических трасс. // Геофизика. – 2005. – № 1. – С. 12-16.
3. Дробинский А. А., Гольчикова Н. Н., Камнев П. П. Особенности строения и перспективы нефтегазоносности палеоканала, выявленного по данным МОГТ в восточной части Каракульско-Смушковской зоны поднятий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – № 10 (3). – С. 114-126.
4. Иванов А. И. Комментарий к статье А. В. Череповского «Подавление нестационарных помех путём весового вертикального суммирования и медианной фильтрации». // Геофизика. – 2011. – № 1. – С. 20-21.
5. Козырев В. С. Учёт неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. Современные технологии. / В. С. Козырев, А. П. Жуков, И. П. Коротков, А. А. Жуков, М. Б. Шнерсон. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 227 с.
6. Кузнецов Е. С., Баландин П. В., Дробинский А. А., Череповский А. В. Результаты анализа полевых данных ОМР МОГТ-3D, полученных по технологии возбуждения сигнала

в движении GLIDE. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2021. – № 1 (68). – С. 12-19.

7. Левицкий А. А., Рудаков А. В., Левицкая М. С. Специфика получаемого сейсмического материала в сложных сейсмогеологических условиях (заболоченная местность). // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – № 9 (1). – С. 97-109.

8. Романов В. В. Адаптивное суммирование при накоплении сейсмограмм. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2015. – № 4. – С. 60-63.

9. Сагалова Е. И., Червонский М. И. Способ суммирования сейсмических сигналов. // УкрНИГРИ. – 1970. – Бюл. 16. – С. 42.

10. Череповский А. В., Гафаров Р. М. Весовое суммирование как редактор нестационарных помех в невзрывной сейсморазведке. // Геофизика. – 2013. – Вып. 2. – С. 70-75.

11. Череповский А. В. Подавление нестационарных помех путём весового вертикального суммирования и медианной фильтрации. // Геофизика. – 2011. – Вып. 1. – С. 14-19.

12. Притчетт У. К. Получение надёжных данных сейсморазведки. / Пер. с англ. В. П. Номоконова, М. Б. Шнеерсон. – М.: Мир, 1999. – 448 с.

13. Хаттон Л. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. / Л. Хаттон, Дж. Мейкин, М. Уэрдингтон. Пер. с англ. под ред. А. Л. Малкина. – М.: Мир, 1989. – 216 с.

14. Anderson R. G., McMechan G. A. Automatic editing of noisy seismic data. // *Geophysical Prospecting*. – 2006. – No. 37 (8). – pp. 875-892.

15. Anderson R. G., McMechan G. A. Weighted stacking of seismic data using amplitude decay rates and noise amplitudes. // *Geophysical Prospecting*. – 1990. – Vol. 38. – pp. 365-380.

16. Gimlin D. R., Keener M., Lawrence J. F. Maximum likelihood stacking in white Gaussian noise with unknown variance. // *IEEE Transact. on Geoscience and Rem. Sen.* – 1982. – Vol. 20. Iss. 1. – pp. 91-98.

17. Liu G., Fomel S., Jin L., Chen X. Stacking seismic data using local correlation. // *Geophysics*. – 2009. – Vol. 74. No. 3. – pp. V43 – V48.

18. Rietsch E. Estimation of the signal-to-noise ratio of seismic data with an application to stacking. // *Geophysical Prospecting*. – 2006. – No. 28 (4). – pp. 531-550.

19. Robinson J. C. Statistically optimal stacking of seismic data. // *Geophysics*. – 1970. – Vol. 35. Iss. 3. – pp. 387-522.

20. Sanchis C., Hanssen A. Enhanced local correlation stacking method. // *Geophysics*. – 2011. – Vol. 76. No. 3. Iss. 1. – pp. V33 – V45.

21. Stefanou G., Manolis P. Spectral representation versus Karhunen-Loeve expansion for the simulation of stochastic fields: a comparative study. // 8th HSTAM International Congress on Mechanics. – 2007. – pp. 75-82.

22. Tyapkin Y., Ursin B. Optimum stacking of seismic records with irregular noise. // *Geophysics and Engineering*. – 2005. – No. 2. – pp. 177-187.

23. White R. E. The performance of optimum stacking filters in suppressing uncorrelated noise. // *Geophysical Prospecting*. – 2006. – Iss. 25 (1). – pp. 165-178.

24. Yadav D. K., Manpura A. K., Patney R. K. Stacking Seismic Data Based on Ramanujan Sums. // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2020. – Vol. 17. Iss. 9. – pp. 1633-1636.

25. Yilmaz O. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. // *Society of Exploration Geophysicists* – 2001. – 2038 p.

26. Zhou H.-W. Practical seismic data analysis. // Cambridge University Press. – 2014. – 510 p.

References

1. Denisov M. S. On the choice of weights of stacking the seismic traces. Comments to the article by A. V. Cherepovskiy. *Geophysics*, 2011. Iss. 1. pp. 22-26. (In Russ.)

2. Denisov M. S., Finikov D. B. A method of sampling noise attenuation when seismic traces stacking. *Geophysics*, 2005. Iss. 1. pp. 12-16. (In Russ.)

3. Drobinskiy A. A., Golchikova N. N., Kamnev P. P. Structure features and oil and gas pros-

pect of paleochannel revealed with 2D seismic data in The East of Karakulsko-Smushkovskaya uplift zone. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Iss. 10 (3). pp. 114-126. (In Russ.)

4. Ivanov A. I. Comments to the article by A. V. Cherepovskiy: Suppression of non-stationary noise by the weighted vertical summation and median filtering. *Geophysics*, 2011. Iss. 1. pp. 20-21. (In Russ.)

5. Kozyrev V. S., Zhukov A. P., Korotkov I. P., Zhukov A. A., Shneerson M. B. Accounting of up part of section in prospecting seismology. *Modern Technologies*. Moscow. LLC Nedra-Businesscenter, 2003. 227 p. (In Russ.)

6. Kuznetsov E. S., Balandin P. V., Drobinskiy A. A., Cherepovskiy A. V. Analysis of 3D research-methodical works seismic data, obtained with GLIDEtechnology. *Devices and syst. of explor. Geophysics*, 2021. Iss. 1 (68). pp. 12-19. (In Russ.)

7. Levitskiy A. A., Rudakov A. V., Levitskaya M. S. Specificity of the seismic material obtained in complex seismo geological conditions (swamp zone), 2019. Iss. 9 (1). pp. 97-109. (In Russ.)

8. Romanov V. V. Adaptive stacking when seismograms summing. *Devices and syst. of explor. Geophysics*, 2015. Iss. 4. pp. 60-63. (In Russ.)

9. Sagalova E. I., Chervonskiy M. I. The method of seismic signal stacking. *UkrSRMI*, 1970. Bull. 16. pp. 42. (In Russ.)

10. Cherepovskiy A. V., Gafarov R. M. Diversity stack as an editor of non-stationary noise in nonexplosive seismic. *Geophysics*, 2013. Iss. 2. pp. 70-75. (In Russ.)

11. Cherepovskiy A. V. Suppression of non-stationary noise by the weighted vertical summation and median filtering. *Geophysics*, 2011. Iss. 1. pp. 14-19. (In Russ.)

12. Pritchett W. C. *Acquiring Better Seismic Data*. Translate from English of Nakomova V. P., Shneerson M. B. Moscow. Mir, 1979. 256 p. (In Russ.)

13. Hatton L., Makin J., Worthington M. *Seismic data processing. Theory and practice*. Translate from English under redaction of Malkin A. L. Moscow. Mir, 1989. 216 p. (In Russ.)

14. Anderson R. G., McMechan G. A. Automatic editing of noisy seismic data. *Geophysical Prospecting*, 2006. No. 37 (8). pp. 875-892.

15. Anderson R. G., McMechan G. A. Weighted stacking of seismic data using amplitude decay rates and noise amplitudes. *Geophysical Prospecting*, 1990. Vol. 38. pp. 365-380.

16. Gimlin D. R., Keener M. S., Lawrence J. F. Maximum likelihood stacking in white Gaussian noise with unknown variance. *IEEE Transact. on Geoscience and Rem. Sen.*, 1982. Vol. 20. Iss. 1. pp. 91-98.

17. Liu G., Fomel S., Jin L., Chen X. Stacking seismic data using local correlation. *Geophysics*, 2009. Vol. 74. No. 3. pp. V43-V48.

18. Rietsch E. Estimation of the signal-to-noise ratio of seismic data with an application to stacking. *Geophysical Prospecting*, 2006. No. 28 (4). pp. 531-550.

19. Robinson J. C. Statistically optimal stacking of seismic data. *Geophysics*, 1970. Vol. 35. Iss. 3. pp. 387-522.

20. Sanchis C., Hanssen A. Enhanced local correlation stacking method. *Geophysics*, 2011. Vol. 76. No. 3. Iss. 1. pp. V33-V45.

21. Stefanou G., Manolis P. Spectral representation versus Karhunen-Loeve expansion for the simulation of stochastic fields: a comparative study. *8th HSTAM International Congress on Mechanics*, 2007. pp. 75-82.

22. Tyapkin Y., Ursin B. Optimum stacking of seismic records with irregular noise. *Geophysics and Engineering*, 2005. No. 2. pp. 177-187.

23. White R. E. The performance of optimum stacking filters in suppressing uncorrelated noise. *Geophysical Prospecting*, 2006. Iss. 25 (1). pp. 165-178.

24. Yadav D. K., Manpura A. K., Patney R. K. Stacking Seismic Data Based on Ramanujan Sums. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020. Vol. 17. Iss. 9. pp. 1633-1636.

25. Yilmaz O. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of Exploration Geophysicists, 2001. 2038 p.

26. Zhou H.-W. *Practical seismic data analysis*. Cambridge University Press., 2014. 510 p.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК: 550.8.053

DOI: 10.46698/VNC. 2021.40.15.009

Оригинальная статья

Обзор технологий комплексной обработки переинтерпретации данных геофизических исследований скважин для детального расчленения разреза и переоценки запасов углеводородов

Т. Б. Эзирбаев 

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

Статья поступила: 26.04.2020, доработана: 21.05.2021, одобрена в печать: 10.06.2021

Резюме: Актуальность работы. По материалам имеющейся в открытом доступе зарубежной и отечественной научной литературы и собственных исследований выполнен аналитический обзор наиболее известных отечественных и зарубежных технологий и методик оцифровки, детальной обработки и комплексной интерпретации каротажных данных, записанных с целью литологического расчленения разреза и выявления продуктивных пород – коллекторов. **Цель работы.** Полученные конечные результаты и сопоставление их с данными лабораторного анализа кернов позволяет сделать вывод о том, что использование современных технологий интерпретации данных ГИС дает возможность более детально и достоверно оценить геологические характеристики и флюидонасыщенность вышеуказанных отложений. **Методы исследования.** В основной части приведены фактические результаты обработки и переинтерпретации данных ГИС, записанных напротив различных отложений по разным месторождениям ряда стран, результаты собственного опыта (оцифровка, обработка и переинтерпретация данных ГИС), полученные на фактическом материале по карбонатным и терригенным отложениям верхне- и нижнемелового комплексов Терско-Сунженской нефтегазоносной области с использованием системы Gintel. В рассматриваемых методиках применяются различные алгоритмы, схемы обработки и интерпретации данных ГИС, включающие систему определенных петрофизических моделей, стохастических связей, количественных и качественных критериев и ограничений. **Результаты исследования.** При этом рассмотрено применение для определения свойств пород коллекторов как всех известных петрофизических моделей, базирующихся на одно- и двухкомпонентной модели породы (песчаники, глинистые песчаники, содержащие влажную глину), изложено использование системы петрофизических моделей, описывающих трехкомпонентную модель песчано-алеврито-глинистой породы, позволяющей построить по данным ГИС в полном объеме структурно-минералогическую и флюидальную модели изучаемой толщи. Оптимальный выбор вычислительных схем и систем петрофизических моделей и связей определяется в процессе адаптации методики к конкретным геологическим условиям изучаемого разреза.

Ключевые слова: каротаж, обработка, интерпретация, переинтерпретация, пористость, проницаемость, коллектор, нефть, газ, месторождение.

Для цитирования: Эзирбаев Т.Б. Обзор технологий комплексной обработки переинтерпретации данных геофизических исследований скважин для детального расчленения разреза и переоценки запасов углеводородов. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.40.15.009.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-15-50298.

GEOPHYSICAL METHODS

DOI: 10.46698/VNC.2021.40.15.009

Original paper

Review of technologies for integrated processing of reinterpretation of well logging data for detailed dissection of the section and revaluation of hydrocarbon reserves

T. B. Ezirbaev 

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

Received: 26.04.2021, revised: 21.05.2021, accepted: 10.06.2021

Abstract: Relevance. The article provides an introductory overview of the most famous domestic and foreign technologies and techniques for digitizing, detailed processing and comprehensive interpretation of log data recorded for the purpose of lithological dissection of the section and identification of productive rocks – reservoirs. **Aim.** Where the final result of interpretation and assessment of the reliability of the data obtained by comparison with the laboratory analysis of the core confirm that the interpretation of well logging results using modern technologies makes it possible to determine in more detail the geological characteristics and oil and gas saturation of the Lower Cretaceous terrigenous deposits of the Tersko-Sunzhensky oil and gas region. **Methods.** The main part contains the actual results of processing and reinterpretation of well logging data recorded opposite various deposits in different fields of a number of countries, the results of our own experience include the results of digitization, processing and reinterpretation of well logging data from stock materials on carbonate and terrigenous deposits of the Upper and Lower Cretaceous of the Tersko-Sunzhensky oil and gas region in the Gintel system. In the used technique, various algorithms, schemes for processing and interpreting well logging data are used, using a system of certain petrophysical models, stochastic relationships, quantitative and qualitative criteria and constraints. **Results.** At the same time, it considers the application for determining the properties of reservoir rocks as all known petrophysical models based on one- and two-component rock models (sandstones, clayey sandstones containing wet clay), and describes in detail the use of a system of petrophysical models describing a three-component model sandy-silty-clayey rock, which makes it possible to construct the structural-mineralogical and fluid models of the studied strata in full according to well logging data. The optimal choice of computational schemes and systems of petrophysical models and connections is determined in the process of adapting the technique to the specific geological conditions of the studied section.

Keywords: logging, processing, interpretation, reinterpretation, porosity, permeability, reservoir, oil, gas, field.

For citation: Ezirbaev T. B. Review of technologies for integrated processing of reinterpretation of well logging data for detailed dissection of the section and revaluation of hydrocarbon reserves. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC.2021.40.15.009.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-15-50298.

Введение

Существует несколько факторов, влияющих на дальнейшее развитие рынка геолого-геофизических услуг. Один из них – потребность доизучения современными методами месторождений на поздних стадиях добычи. Еще один фактор –

необходимость достоверной оценки новых месторождений и применение новых технологических решений в условиях высокой геологической неопределенности. Ключевой моментом здесь является возможность интеграции практически любой доступной информации в цифровые модели месторождений. Отличительная особенность большинства зрелых месторождений – ограниченный объем и неполный комплекс имеющихся исследований, необходимых для принятия решений по дальнейшей разработке. Этот недостаток данных сильно затрудняет создание достоверной геологической модели объекта как инструмента для локализации потенциально продуктивных зон. Поэтому дальнейшее развитие методологий геолого-геофизического изучения и моделирования нефтегазовых месторождений непосредственно связано с повышением точности исследования пластов геофизическими методами и применением современных нестандартных методов полевых и скважинных исследований. Также большое значение имеет внедрение передового мирового опыта исследований низкопроницаемых коллекторов [Левин, 2018]. Вопрос оцифровки, обработки и переинтерпретации данных геофизических исследований скважин, а в отдельных случаях и доисследование с помощью современных техник и технологий, является весьма актуальным на сегодняшний день. Особенно важен и целесообразен данный процесс на длительно разрабатываемых месторождениях, которые исходя из предыдущих оценок запасов углеводородов можно считать практически выработанными, также вследствие длительного и неравномерного воздействия на залежь заводнения происходит изоляция нефтенасыщенных участков с наименьшими коллекторскими свойствами и образование техногенных скоплений подвижных углеводородов. Все описанные явления существенно изменяют геологические характеристики залежи, отражаются в физических полях методов ГИС. К категории вышеописанных месторождений можно отнести и месторождения Терско-Сунженской нефтегазоносной зоны [Александров и др., 2016].

Переинтерпретация на основе современных автоматизированных систем обработки и интерпретации данных ГИС, с применением более совершенных методик, алгоритмов и математических моделей позволит более детально расчлнить разрезы, выявить продуктивные пропластки которые были упущены по ряду причин: неоптимальность комплекса ГИС и технологии исследований, недостатки метрологического обеспечения, методики индивидуальной и комплексной обработки и интерпретации данных ГИС. Обширный объем геолого-геофизической информации, получаемой при современной более детальной интерпретации данных ГИС позволяет обосновать наиболее подходящую технологию геологического моделирования, которая дает возможность увидеть максимально полную картину фактической геологической неоднородности пород, которые потенциально могут содержать запасы углеводородов [Eberle, 1992; Shahinpour, 2013; Rider, 2002; Shil et al., 2004].

Помимо всего сказанного масштабная оцифровка фоновых геофизических материалов, обработка и создание базы данных позволят привлечь полученные скважинные данные и результаты интерпретации для разработки геоинформационных технологий комплексного мониторинга природных ресурсов, т. е. полученные результаты могут быть использованы для создания конкретных цифровых карт и каталогов в среде геоинформационных систем, что в дальнейшем позволит вести систематический мониторинг разных природных и техногенных процессов, которые могут происходить из-за длительной разработки месторождений в

нефтегазоносных районах [Булаева и др., 2020; Эльсункаева, 2017; Spreckels et al., 2008].

Методы исследования

На сегодняшний день рынок услуг в сфере производства оборудования и проведения геофизических исследований скважин представлен множеством крупных компаний и малых предприятий. Различные инструменты для визуализации скважин от разных сервисных компаний теперь доступны в нефтяной отрасли, каждая из которых имеет свои особенности, присущие конкретной скважине/пласту. Каротаж может быть проведен как во время бурения (LoggingWhileDrilling (LWD)) [Simpson, 2017] так и после. Наиболее популярны на мировом уровне на сегодняшний день три сервисные компании BakerHughes, Schlumberger и Halliburton из Российских можно выделить АО «Газпром-нефть», АО «Башнефтегеофизика», АО «РосГео», на Северном Кавказе – ООО «СевКавнефтегазгеофизика».

Среди программных комплексов обработки и интерпретации данных ГИС больше распространены и применяются на международном уровне пакеты: Petrel Schlumberger, Techlog Schlumberger, Interactive Petrophysics, Roxar, SONATA, Prime, Gintel, Geophysics Office, Tigress, GeoPoisk, LogPW in Neftegaz-Geofizika LLC. Из этих программных продуктов как наиболее распространенные на территории РФ можно отметить следующие комплексы: «Gintel», «Прайм», «Камертон», «ГеоПоиск», Techlog, LogPWin, «СОНАТА». LogPWin имеет различные модули для обработки специализированных геофизических методов, но привязан только к оборудованию ООО «Нефтегазгеофизика». Платформа Techlog, состоит из множества различных модулей, что позволяет использовать ее для обработки практически любых данных ГИС, однако комплекс, содержащий так много модулей и способный решать задачи разного уровня сложности и специфики, не может не стоить дорого, в силу этого и применяется в РФ исключительно крупными нефтяными и сервисными компаниями, а также имеет ограничение на поддержку ряда отечественных аппаратных комплексов [Шумилов, 2019].

Система Gintel обеспечивает высокоэффективную массовую обработку и интерпретацию данных ГИС в открытом стволе скважины при решении широкого спектра геологических задач поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа.

Библиотека обрабатывающих программ системы Gintel содержит компоненты, обеспечивающие настройку вычислительных процессов на геологические особенности изучаемого разреза, особенности решаемой геологической задачи, состояние скважины при проведении геофизических работ, а также информационно-измерительную систему каротажа (ИИСК).

Интерпретация данных ГИС в системе Gintel выполняется в попластовом или поточечном вариантах как по традиционным для нефтегазовой отрасли методикам, так и по произвольным алгоритмам пользователя, включающим формулы, петрофизические связи и палетки, системы уравнений, а также эвристические схемы обобщения и принятия решений (экспертные системы).

Автоматизированная система обработки и интерпретации данных ГИС Gintel функционально предполагает возможность дополнения линейкой авторских методик интерпретации данных ГИС, позволяющих более обосновано решать задачи разведки и разработки месторождений [Афанасьев, 2008, 2009].

Обзор результатов, полученных зарубежными исследователями

Переинтерпретация данных каротажа в восточной части бассейна Галилеи Австралийского Квинсленда, была проведена по материалам из 585 разведочных скважин, 224 из которых пересекают отложения Галилейской котловины.

Необходимость переинтерпретации была вызвана несоответствием некоторых данных интерпретации, установленной и принятой стратиграфии изучаемого бассейна [McKellar, Henderson, 2013]. Проблема этого несоответствия усугублялась тем, что на данном участке проведением каротажа занимались несколько разных подрядчиков.

Все описанные факторы создают дополнительные ограничения на определение фациального состава, особенно для неугольных интервалов. Определение фаций имеет важное значение для определения стратиграфии по скважинам и, в конечном результате, установления размеров месторождения.

Пересмотренные стратиграфия и контуры месторождения основаны на дополнительной обработке данных ГИС и корреляции их с данными наиболее представительных скважин Towerhill 1 и Koburra 1 [DEEDI, 2011]. Так, например, результаты интерпретации данных из скважины Solomon 1-1A коррелировали с данными скважин Koburra 1 и Towerhill 1, как было сказано выше.

Как итог, результаты переинтерпретации каротажного материала выявили несоответствия представления о стратиграфии изучаемого района и размерам месторождения, которые были приняты ранее и опубликованы по бассейну Галилеи. Эти несоответствия наиболее выражены в восточной части бассейна Галилеи. Это основной район предлагаемых разработок в области добычи угля и разведки CSG.

Также разработка более точных детальных структурных карт бассейна Галилеи – важный шаг в создании трехмерной модели залежи изучаемого района [Hansen, Uorda, 2018].

Совместная переинтерпретация проведенного ранее стандартного комплекса каротажа с результатами электрического каротажа высокого разрешения Weatherford Compact MicroImager (CMI) была проведена в газоразведочной скважине, расположенной на севере Молдавской платформы – Румыния.

Зонд микрокаротажа высокого разрешения Weatherford Compact MicroImager (CMI), создает «изображение удельного сопротивления» с высоким разрешением по всей окружности скважины за счет 176 электродов, равномерно распределенных по восьми контактным площадкам, это обеспечивает более качественное выделение коллекторов и снижает потребность в дорогостоящих данных керна (рис. 1.).

Проницаемые зоны можно выделить без труда, анализируя кривые (GR) и метода (SP). Низкие значения показаний гамма-метода и положительные отклонения метода ПС указывают на пять интервалов коллектора, два из которых тонкие (толщина около 1 м). Высокие значения метода сопротивления, пересечение плотностных и нейтронных кривых на глубине 456,5-464,0 м указывают на коллектор (газонасыщенный пласт) толщиной 7,5 м.

С другой стороны, низкая плотность – расхождение кривых нейтронов и низкие показания каротажа сопротивлений указывают на то, что поровое пространство самого нижнего пласта (542,0-552,0 м) заполнено проводящей пластовой водой.

Обработка и интерпретация были проведены с использованием программного обеспечения LR Senenergy Interactive Petrophysics (IP).

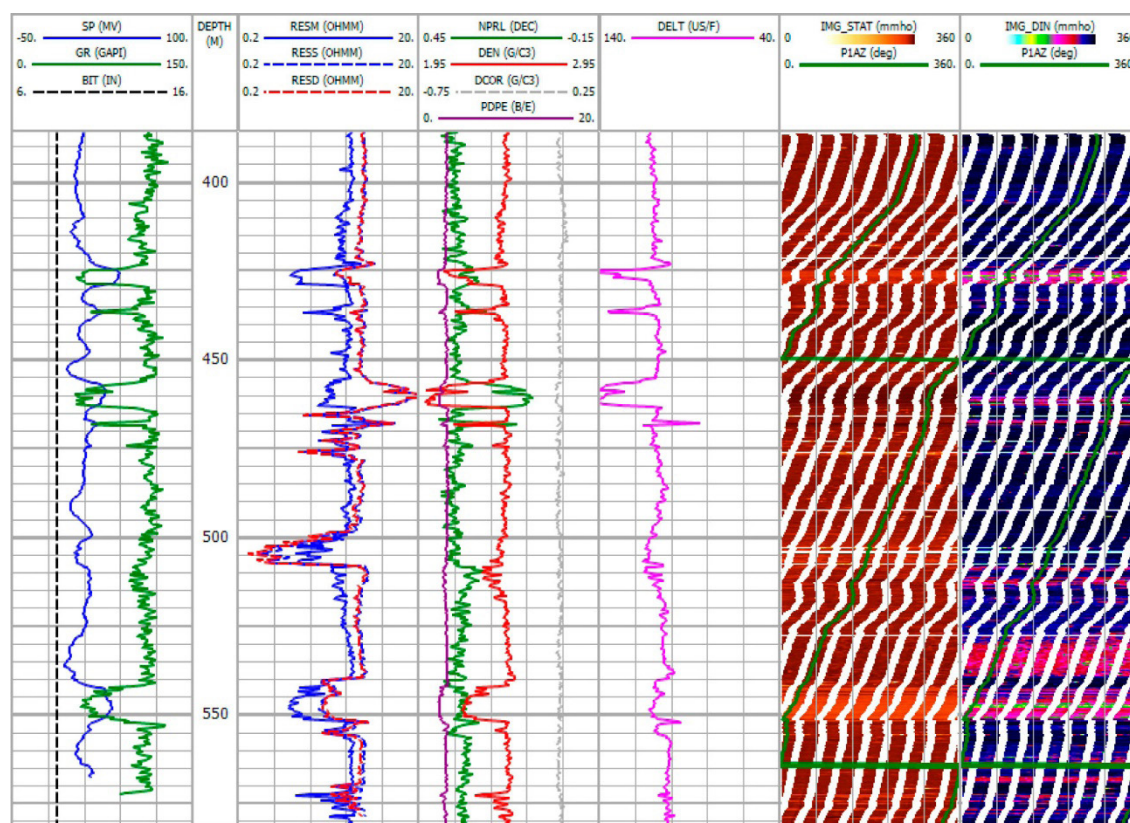


Рис. 1. Стандартный набор каротажных диаграмм, записанных напротив сарматских отложений и интерпретированный в комплексе с данными СМН (статическая и динамическая нормализация – последние два поля) /

Fig. 1. Standard set of well logs recorded opposite the Sarmatian deposits and interpreted in conjunction with CMI data (the last two fields are static and dynamic normalization)

Для количественной оценки пласта с точки зрения литологии и флюидонасыщения, традиционные каротажные данные были интерпретированы с использованием вероятностного метода MineralSolver, модуль интегрирован в программное обеспечение IP [Interactive PetrophysicsV3.6, 2017].

Итогом данного дополнительного исследования разведочной скважины Северо-Молдавской платформы Румынии помимо прочего стало выявление нескольких потенциальных газоносных пластов и одного водоносного горизонта. Основной газоносный пласт расположен в интервале 456,5–464,0 м [Niculescu et al., 2015].

Переинтерпретация с моделированием упругих свойств горных пород была проведена для более точного определения характера насыщения коллекторов нефтяного месторождения Чандмари в Верхнем Ассам-Араканском бассейне в Индии. Всего было обработано данных комплексов ГИС из шести скважин по месторождению. Комплекс включал в себя в большинстве случаев гамма- и нейтронные методы, каротаж плотности, методы бокового и микрокаротажа, а также данные каверномера-профилемера.

После тщательного анализа всех предварительных данных было установлено, что большинство скважин имеют аномальные отклонения по показаниям, кавернометрии, что могло бы привести к искажению данных микрозондов.

Для того, чтобы минимизировать влияние скважины на показания микрозондов, данные кавернометрии и профилиметрии были продифференцированы уравнением

и с помощью автоматических систем обработки были построены так называемые синтезированные кривые [Xin, Nan, 2009].

На рисунке 2 показано, как кривая с некорректными показаниями на планшете предварительной обработки (поле 3, кривая плотности) корректируется в том числе путем увязки с кривыми других методов. Решение достигается подгонкой кривой плотности с помощью множественных линейных регрессий. Формула регрессии проверяется путем сверки результата с данными по скважине, где кривая плотности записана корректно. Затем скорректированная (synthetic) кривая накладывается на реальную [Mukerji et al., 2008]. Требуется несколько итераций, чтобы получить кривую, которая согласуется с моделью физики горных пород и данными акустического исследования.

Окончательные результаты интерпретации по данным скважины Well-A приведены на рисунке 3. Необработанные кривые каротажа показаны на полях 1-4. Результаты петрофизического анализа приведены на полях 5 и 6. Поле 5 показывает объемную модель пород (серая заливка – глины, желтая – песчаник, голубая – пористость), в то время как трек 6 демонстрирует эффективную мощность.

Аналогично скважине Well-A были выявлены песчанистые пласты-коллекторы и в остальных скважинах, использованных в данном исследовании [Kumar et al., 2018].

Группой исследователей из Инженерно-технологического колледжа JCT в работе «Application of conditioning, curvesynthesizing and quality control of welllogdata's» [Nishanth, 2019] по вышеописанной методике также были обработаны данные каротажа по кластеру из пяти скважин месторождения National Petroleum Reserve Alaska (NPR) США, Аляска.

Обработка по вышеописанной методике позволила дать оценку типа жидкости и ее количества, определить глубину залегания и контуры месторождения.

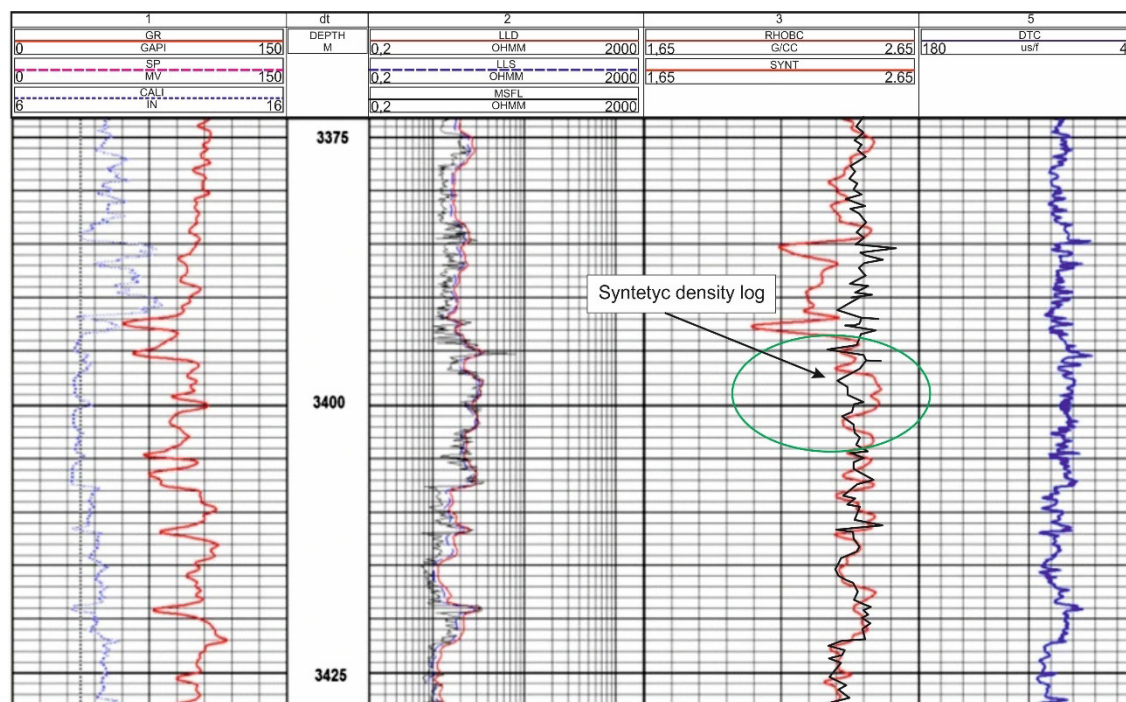


Рис. 2. Скважина Well-A, синтезированная кривая плотности (черная) поверх измеренной кривой плотности /

Fig. 2. Well-A, synthesized density curve (black) over the measured density curve

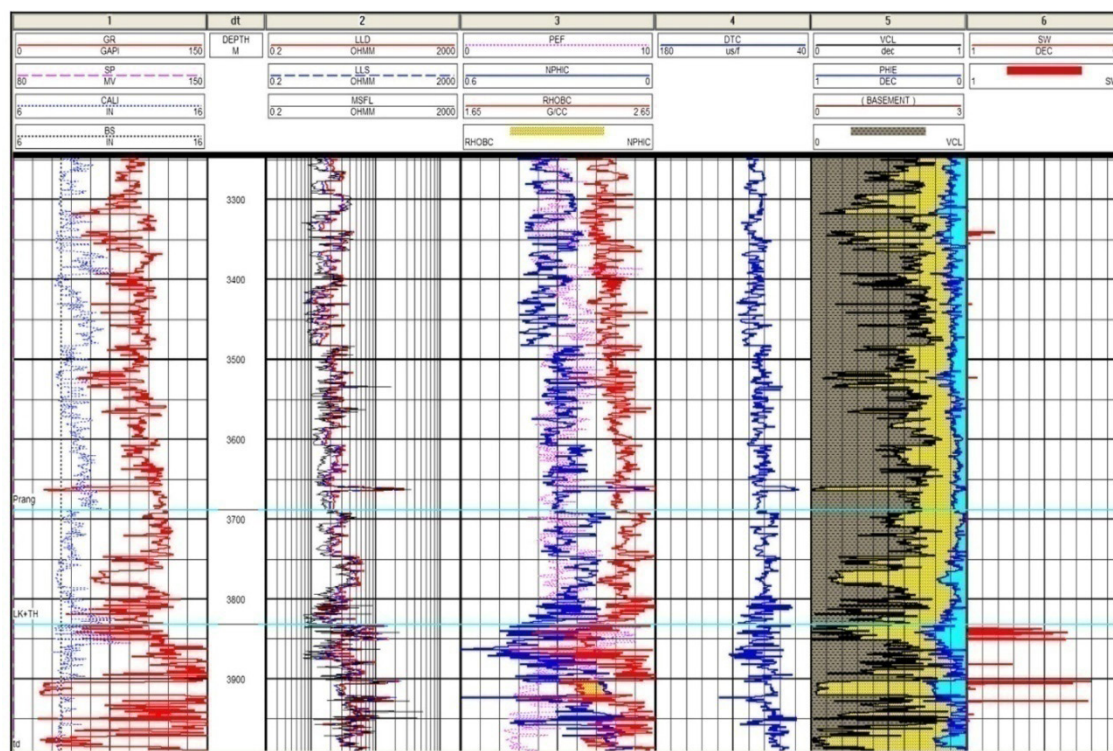


Рис. 3. Окончательные результаты интерпретации по данным скважины Well-A /
Fig. 3. Final interpretation results according to the Well-A data

Контроль качества данных и доведение до кондиции кривых играет важную роль в качестве результата интерпретации. В данной работе была проведена оценка качества данных, выявлены скважины и интервалы, по которым данные были недостаточного качества, некачественные данные были исправлены с использованием метода MLR (многолинейной регрессии) и путем построения кривой по данным других скважин, которые были записаны качественно и могли бы служить эталоном. Обработка была проведена с помощью программного обеспечения TECHLOG2015 [Techlog Fundamentals, 2015].

Группой исследователей из китайского университета China University of Petroleum был проведен анализ результатов геофизических исследований скважин и петрофизических характеристик газоносных сланцев китайской провинции Сычуань.

Сланцевые отложения часто рассматриваются как покрывка (перекрывающий породу-коллектор или промежуточный слой) нефтегазового коллектора и обычно игнорируются при оценке литологии. Интерес к исследованию сланца развился, когда сланцевый газ стал рассматриваться как разновидность нетрадиционного газового ресурса для разработки.

Газоносные сланцы, как правило, обладают низкой пористостью и проницаемостью, что в свою очередь приводит к сложности их выявления как продуктивной толщи по кривым традиционного каротажа.

Исследование физических свойств по результатам каротажа является одной из ключевых проблем, которые необходимо решить при разработке сланцевого газа [Wei et al., 2014; Xiaoling, 2013].

При исследовании газоносных сланцев бассейна реки Сычуань были обработаны и проинтерпретированы результаты стандартного набора методов ГИС, который

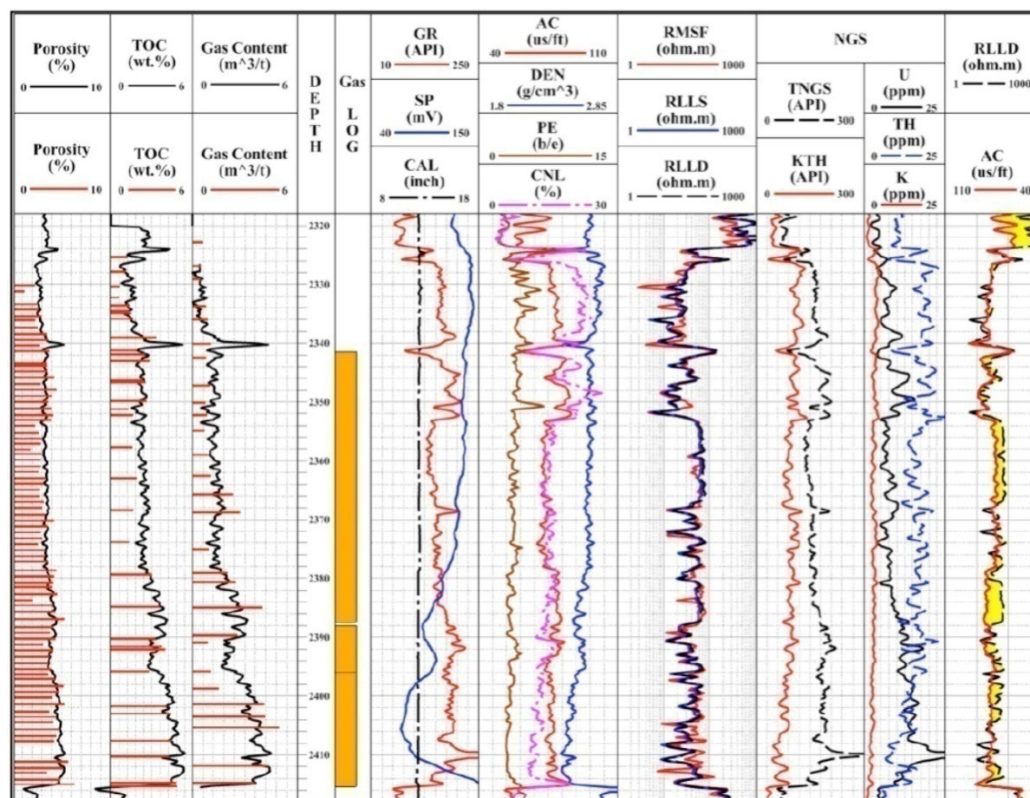


Рис. 4. Результат предварительной обработки данных ГИС в разрезе с содержанием сланцевого газа, Сычуань /

Fig. 4. The results of GIS-data preprocessing in the section with the content of shale gas, Sichuan

утвержден и является обязательным в данном районе, а также были в комплексе со специальными дополнительными методами ГИС, которые позволили дать качественную характеристику сланцевым коллекторам.

Стандартный набор ГИС служит в первую очередь для литологического расчленения разреза и, тем самым, для выявления участков глин (рис. 4).

Некоторые специальные методы каротажа скважин позволяют решать дополнительные задачи, например, элементная спектроскопия ECS [Well Evaluation, 2008] позволяет изучать минералогию, литологию, содержание глины, плотность материнской породы, количество поглощенного и свободного газа, ядерно-магнитно-резонансный каротаж (NMR), кросс-дипольный акустический каротаж, телеметрии LWD/MWD решают задачи расчета и помогают изучать естественные трещины и трещины, вызванные бурением [Qicui et al., 2013; Baoquan et al., 2011; Weidong et al., 2011].

В своей диссертации Aziz Mennan, магистрант Миссурийского университета науки и техники, приводит результаты исследования на тему «Интерпретация каротажа скважин и 3D сейсморазведки для изучения свойств пласта с целью моделирования месторождения Maui-B, месторождения Таранаки, Новая Зеландия.

В этом исследовании обобщение результатов интерпретации данных сейсморазведки и каротажа скважин позволило определить глубину залегания и толщину углеводородных коллекторов месторождения.

Для корреляции глубин и выявления проницаемых зон использовались гамма-метод, метод ПС и данные кавернометрии. В результате были выявлены пять раз-

личных литофаций, где распределение песчаников и глинистых пород оказывает существенное влияние на качество коллекторов.

Для оценки пористости, которая показала величины 15-25%, использовался метод матричного отождествления (MID). Кроме того, была оценена проницаемость. Достоверность всех полученных результатов была подтверждена путем калибровки с использованием имеющихся данных керна. Также, по результатам данных удельного сопротивления и данных керна была оценена водонасыщенность – от 9% до 40%.

Наконец, были оценены запасы нефти и газа на исследуемом месторождении [Mennan, 2017].

Результаты, полученные автором

Изучение структурно-минералогических и емкостно-фильтрационных характеристик вмещающих пород залежей нефти и газа, основанное на построении и исследовании детальных трехмерных геологических моделей, играет важную роль для обеспечения рентабельной эксплуатации месторождений, которые длительное время находятся в разработке. Особенно это касается сложнопостроенных терригенных карбонатных и отложений.

Только на основе материалов геофизических исследований скважин (ГИС) можно получить объемное представление о строении и детальных геологических свойствах залежей углеводородов. Данные ГИС, особенно на месторождениях, эксплуатируемых длительное время, содержат емкую и подробную информацию о геологических и фильтрационных свойствах среды, коллекторах и запасах углеводородов в них. Другой особенностью данных ГИС является то, что в зависимости от времени проведения ГИС они показывают текущие геологические характеристики горных пород [Александров и др., 2016; Stefan, 2001].

Особенно важен и целесообразен процесс оцифровки и переинтерпретации геофизических данных с учётом и использованием достижений современных техники и технологий обработки и интерпретации данных ГИС в скважинах месторождений, каротаж и интерпретация на которых были проведены только в конце 80- годов XX века и методы интерпретации и, тем более, технология не отвечали современным требованиям и в силу ряда причин не могли дать детальную картину строения вмещающих пород, например, первая нефть из меловых отложений Терско-Сунженской нефтегазоносной области получена еще в начале 50-х годов XX века, а также на месторождениях, разрабатываемых длительно и тем более на месторождениях длительно простаивавших [Александров и др., 2010; Гацаева и др., 2012].

Современные технологии способствуют созданию геоинформационной вычислительной системы, в среде которой можно выполнить подход к комплексной интерпретации данных ГИС по определенному алгоритму, используя все существующие на сегодняшний день в России и за рубежом подходы, включающие всевозможные системы петрофизических связей и моделей.

На основании вышеизложенного приходим к выводу, что для построения геологической модели месторождения требуется специальная технология для глубокой переинтерпретации данных ГИС. Данная технология должна полностью удовлетворять потребности комплексного изучения разреза и основываться на системе методов обработки данных ГИС с учетом новых методологических возможностей

оценки геологических характеристик залежей, обеспечиваемых комплексным первичным анализом геолого-геофизических и промысловых данных, накопленных за период эксплуатации месторождения [Афанасьев В., Афанасьев С., 2002; Афанасьев, 2002].

Одной из таких геоинформационных систем является Система автоматизированной обработки и интерпретации данных ГИС, Gintel, в среде которой была разработана технология обработки и интерпретации материалов каротажа, получаемых в скважинах, вскрывших терригенные толщи сложного структурно-минералогического состава с коллекторами гранулярного типа и карбонатные отложения сложного минерального состава с коллекторами трещинного, трещинно-гранулярного, трещинно-кавернового, трещинно-каверново-гранулярного и гранулярного (порового) типа – технология ESKS [Афанасьев, 2009; Рыбников, Волк, 2017].

При обработке данных ГИС в вычислительной системе Gintel используется метод интерпретирующего моделирования, который дает возможность многомерного определения физических свойств горных пород с возможностью проверки достоверности найденных геологических характеристик разреза путем автоматического сравнения результатов с данными керна, результатами перфорации, данными испытаний или текущими данными на дату каротажа в каждой скважине. Конечные результаты обработки данных ГИС по скважинам оформляются в соответствии с требованиями нормативных документов ГКЗ МПР России [ФГУ «ГКЗ», 2007]. Кроме этого, данные могут экспортироваться в различных принятых форматах для ввода в программные комплексы, выполняющие геологическое моделирование месторождений нефти и газа и подсчет запасов углеводородов в них, например, в используемые в настоящее время в нефтяных компаниях пакеты Petrel (Schlumberger) и IrapRMS (Roxar) [Traning and exercise guide Schlumberger, 2015; RMS, 2012].

В данной методике применяются различные алгоритмы, модели обработки и в ней рассмотрено применение для определения свойств пород-коллекторов как всех известных петрофизических моделей, базирующихся на одно- и двухкомпонентной модели породы (песчаники, глинистые песчаники, содержащие влажную глину), и детально изложено использование системы петрофизических моделей, описывающих трехкомпонентную модель песчано-алеврито-глинистой породы, позволяющей восстановить по данным ГИС в полном объеме структурно-минералогическую и флюидальную модели терригенной толщи. Оптимальный выбор вычислительных схем и систем петрофизических моделей и связей определяется в ходе настройки параметров описываемой методики к тем или иным геологическим условиям изучаемых отложений [Афанасьев, 2008].

По изучаемой территории с использованием вышеописанной технологии, обработаны материалы ГИС из более 10 скважин ряда месторождений Терско-Сунженской нефтегазоносной области, пробуренных на верхний и нижний мел, выполнены исследования и машинная обработка данных результатов лабораторного анализа керна, отобранного напротив изучаемых отложений из более 60 скважин месторождений Терско-Сунженской нефтегазоносной области. Оцифровка аналоговых материалов, машинная обработка и переинтерпретация на данном этапе выполнялись на базе ООО «Геоинформационные технологии и системы» (г. Москва) и Грозненского государственного нефтяного технического университета имени акад. М. Д. Миллионщикова. На основе оцифрованных данных результатов ГИС, лабораторного анализа керна и имеющихся результатов испытаний скважин сформирова-

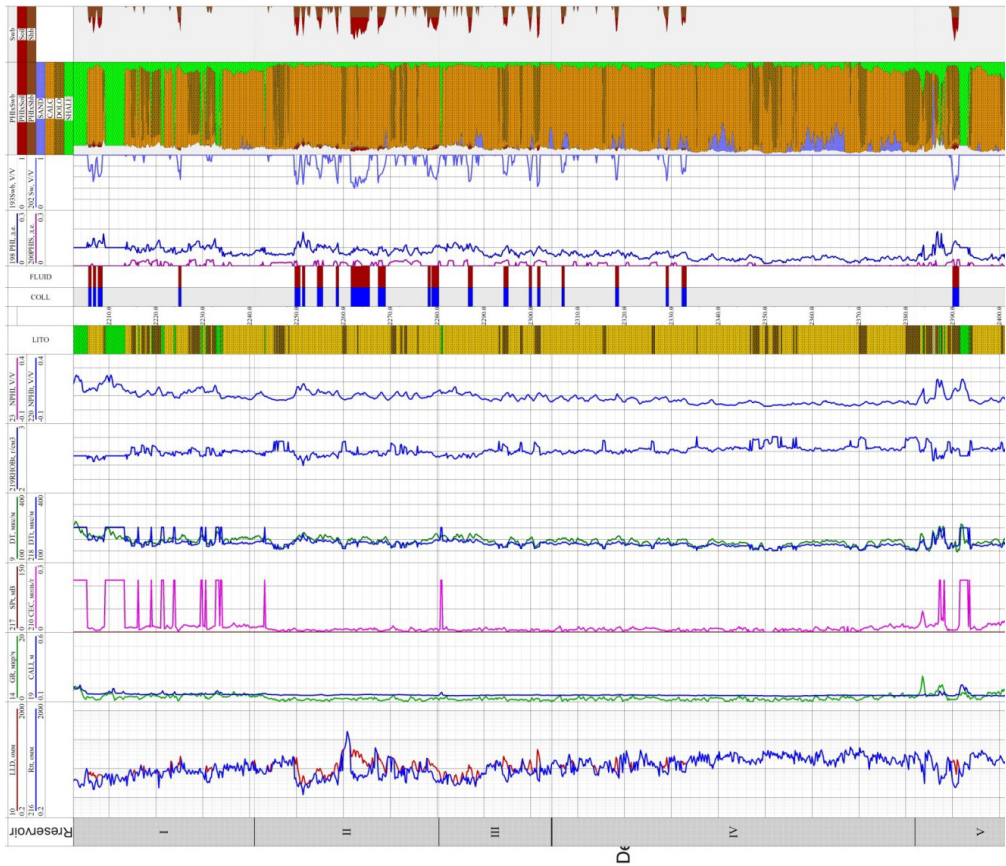


Рис. 6. Планишет с результатами интерпретации данных ГИС, 2200-2410 м
(верхний мел) Карабулак-Ачалукское месторождение /
Fig. 6. Plane table with the results of GIS-data interpretation, 2200-2410 m
(Upper Cretaceous) Karabulak-Achaluk deposit

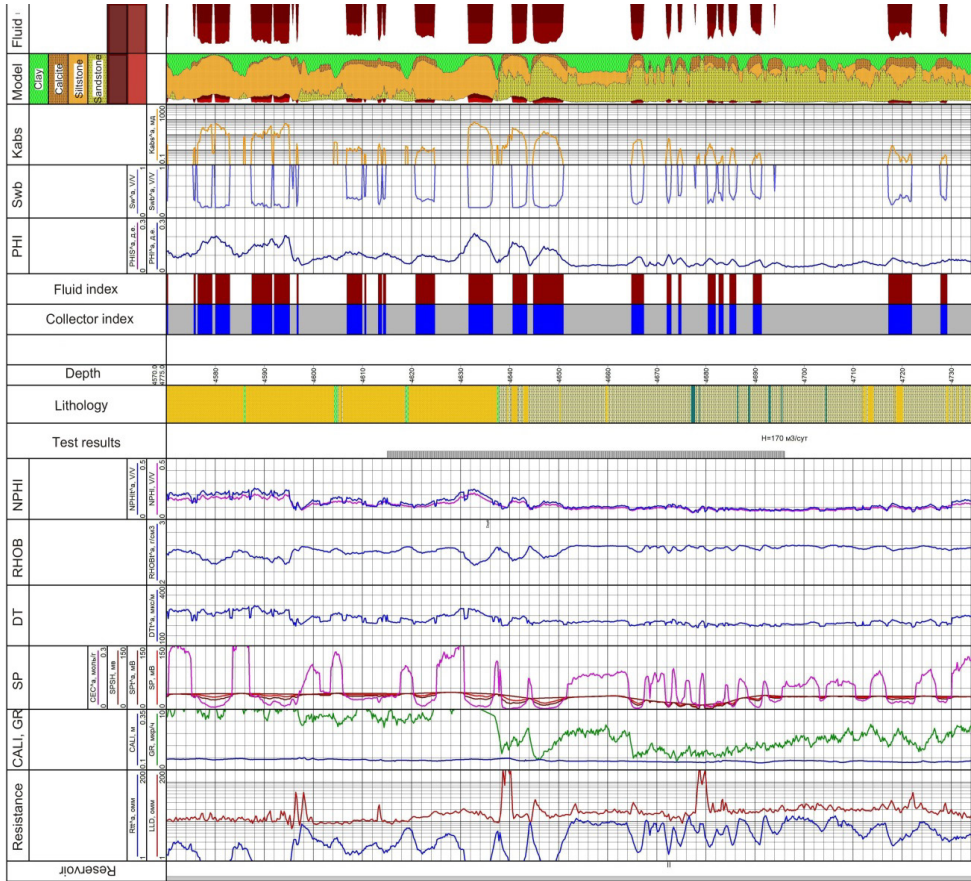


Рис. 5. Планишет с результатами интерпретации данных ГИС, 4570-4775 м
(нижний мел) Старогрозноженское месторождение /
Fig. 5. Plane table with the results of GIS-data interpretation, 4570-4775 m
(Lower Cretaceous) Starogroznozhenskoe deposit

на база данных по изучаемому району в системе Gintel. Обоснованы системы петрофизических связей по данным керн на основе обработки данных керн и ГИС в системе Gintel [Афанасьев и др., 2008; Дахкильгов, Демушкина, 1982; Керимов и др., 2018].

При переинтерпретации материалов каротажа по скважинам были получены объективные данные, свидетельствующие о высокой достоверности разработанного алгоритма обработки данных ГИС в составе методик ТАВС и CARB.

Наглядно эффективность и целесообразность переинтерпретации фондовых материалов и повторного каротажа (при возможности) отображают результаты, представленные на рисунках 5 и 6. На планшете результатов интерпретации данных ГИС по нижнему мелу (рис. 5.) можно наблюдать интервал перфорации скважины, где соответственно напротив отображаются пласты-коллекторы и видно, что ниже и вышеуказанного участка отобразились пласты, в которых по данным переинтерпретации по вышеописанной методике сосредоточены углеводороды. Также можно наблюдать, что основной нефтегазоносный интервал представлен глинистыми алевролитами. Коллектора имеют повышенную пористость, изменяющуюся в диапазоне 8-15%. При этом толща неколлекторов имеет низкую пористость. На рисунке 5 приведен результат переинтерпретации данных ГИС, полученных напротив карбонатных отложений верхнего мела изучаемого района, на котором также были выявлены продуктивные пропластки, которые ранее были пропущены по тем или иным причинам [Кузнецови др., 2020; Эльжаев, 2012; Шнурман, 2011].

Данные, представленные на планшетах, показывают, что знание структурно-минералогического строения карбонатных и терригенных отложений является определяющим фактором выделения в разрезе мелового комплекса интервалов-коллекторов [Баташов, 2013; Заалишвили и др., 2019].

Выводы

Анализ, проведенный в ходе данного обзора, показал эффективность и актуальность приемов доинтерпретации и переинтерпретации каротажных материалов как фондовых, так и текущих исследований независимо от географии и страны проведения исследований. Из представленных результатов выполненных автором исследований видно, что данные о структурно-минералогическом строении пород, которые были получены при интерпретации данных ГИС с помощью алгоритма в составе методики ТАВС, разработанного автором, в полной мере отражают геологическую неоднородность толщи пород, из этого следует что они могут быть использованы для создания методики выделения в разрезе алевролитов и алевроитовых песчаников, которые могут содержать остаточные запасы нефти. Такими телами могут быть участки разреза, характеризующиеся повышенным содержанием алевроитового компонента, в которых при сохранении пористости происходит ухудшение структуры порового пространства, приводящее к увеличению доли связанной воды в коллекторе и к уменьшению его абсолютной проницаемости. В этих условиях для извлечения нефти из локальных залежей в таких геологических телах требуется дополнительная энергия воздействия на них [Керимов и др., 2019].

Литература

1. Александров Б. Л., Хасанов М. А., Эльжаев А. С., Алексеев А. А. Этапы изучения карбонатных коллекторов сложного порового строения верхнемеловых отложений Восточ-

ного Предкавказья. // Межрегиональный Пагуошский симпозиум. Тезисы докладов. – Грозный. – 2010. – С. 261-263.

2. Александров Б.Л., Эльжаев А.С., Хасанов М.А., Гермаханова Д.У. Обоснование предела вторичной пористости для границы коллектор-неколлектор на примере карбонатных отложений Терско-Сунженской нефтегазоносной области. // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 44-48.

3. Афанасьев С.В. Технология комплексной переинтерпретации данных геофизических исследований скважин при создании трехмерной геологической модели длительно разрабатываемой залежи. // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 2. – С. 12-17.

4. Афанасьев В.С. Направления развития научной базы технологии автоматизированной интерпретации материалов ГИС на современном этапе. // Каротажник. – 2008. – № 5 (170). – С. 102-112.

5. Афанасьев В.С. Система автоматизированной визуальной интерпретации результатов геофизических исследований скважин Gintel. / Руководство пользователя. // ООО ГИФТС. – М. – 2009. – 1074 с.

6. Афанасьев В.С., Афанасьев С.В. Развитие технологии автоматизированной интерпретации данных ГИС – основа создания постоянно действующей геолого-технологической модели залежи углеводородов. // Инновационные технологии в области поисков, разведки и детального изучения месторождений нефти и газа. / Материалы научно-практической конференции. – М.: ЦГЭ, 2002. – С. 103-107.

7. Афанасьев А.В., Афанасьев С.В., Тер-Степанов В.В. Обобщенная модель электропроводности терригенной гранулярной породы и результаты ее опробования. // Каротажник. – 2008. – № 12 (177). – С. 36-61.

8. Баташов М.В. Особенности петрофизических характеристик нижнемеловых отложений Терско-Сунженской нефтегазоносной области по геолого-геофизическим данным. // Геология в развивающемся мире: VI научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – 2013. – Т. 2. – С. 134-136.

9. Булаева Н.М., Гайрабеков И.Г., Керимов И.А., Минцаев М.Ш., Эзирбаев Т.Б. Разработка геоинформационных технологий комплексного мониторинга природных ресурсов Чеченской Республики. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 4 (46). – С. 48-55.

10. Гацаева С.С. А., Хасанов М.А., Чимаева Х.Р. История геолого-геофизической изученности палеозойских отложений Восточного Предкавказья. // История науки и техники. – 2012. – № 7. – С. 45-48.

11. Дахкильгов Т.Д., Демушкина Н.В. Петрофизическое обоснование методов интерпретации данных геофизических исследований месторождений ЧИАССР // Нефтегазовая геология и геофизика. – 1982. – № 12. – С. 20-22.

12. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О., Шемпелев А.Г. Признаки геодинамической обстановки и элементов структурно-вещественных комплексов Центрального Кавказа на ГЛУ-БИННОМ разрезе Геналдонского профиля. // Геология и Геофизика Юга России. – 2018. – Т. 8. № 4. – С. 58-74.

13. Керимов И.А., Петров А.В., Абубакарова Э.А. Применение программного комплекса «Коскад 3D» для анализа потенциальных полей Терско-Каспийского прогиба. // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2018. – № 3. Т. 12. – С. 88-96.

14. Керимов И.А., Эзирбаев Т.Б., Эльжаев А.С. Анализ методик выделения коллекторов в альб-аптских отложениях Терско-Сунженской нефтегазоносной области. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 4. – С. 28-37.

15. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Твердохлебов Л.И., Эльжаев А.С., Ризанов Е.Г., Колигаев С.О., Юров А.А., Вьюшкина М.В. Инновационные технологии сейсморазведки для возрождения старых нефтедобывающих районов России. // Деловой журнал Neftegaz. RU. – 2020. – № 4 (100). – С. 68-75.

16. Левин Д. Тренды. Геология и Геофизика. // *Oil & Gas Journal Russia*. – 2018. – № 8 (28). – С. 35.
17. Рыбников А. В., Волк Е. ПК Гинтел-интерпретация данных ГИС для решения задач детального геологического и геомеханического моделирования. // *Комплексное моделирование и оценка нефтегазовых активов в условиях неопределённости*. / XVII Конференция пользователей программного обеспечения и технологических решений компании Roxar, Россия и страны СНГ. – Сочи. – 2017. – 35 с.
18. ФГУ «ГКЗ». Методические рекомендации по составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по технико-экономическим обоснованиям кондиций для подсчета запасов месторождений полезных ископаемых. / Рекомендованы протоколом от 03.04.2007 № 11-17/0044-пр. – М. – 2007. – 43 с.
19. Шнурман И. Г. Модель плиоцен-миоценовых терригенных коллекторов Западного Предкавказья. // *Каротажник*. – 2011. – № 7 (205). – С. 65-72.
20. Шумилов А. В. Анализ существующих и разработка новых программных комплексов обработки и интерпретации информации о геофизических исследованиях скважин. // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2019. – Т. 19. № 2. – С. 162-174. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.6.
21. Эльжаев А. С. История изучения трещинных коллекторов верхнемеловых отложений западной части Терско-Каспийского прогиба. // *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова*. / Годичная научная конференция. – 2019. – С. 471-473.
22. Эльсункаева Э. В. К вопросу об использовании WEB-GIS технологий для мониторинга экологических изменений при эксплуатации геотермальных месторождений. // *ГЕОТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА*. / Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «ГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова». – 2017. С. – 202-207.
23. Baoquan Q., Xiaobing Y., Shudong Z., Zhen C. Shale gas reservoirs evaluation with logging data in the south of Sichuan Basin. // *Natural Gas Industry*. – 2011. – Vol. 31. – pp. 44-47.
24. Bayrak A. ATP 984 – Galilee Basin, Queensland: QER Solomon-1 & 1A Exploration Core Wells, Well Completion Report. // *Queensland Energy Resources, Brisbane*. Unpublished company report held by the Geological Survey of Queensland QDEX Reports System as CR 64794. – 2010.
25. DEEDI. Queensland petroleum geoscience and wireline log data July. // *Geological Survey of Queensland, Department of Employment, Economic Development and Innovation*. – 2011. – 280 p.
26. Eberle D. Interpretation of multi-method geophysical borehole logging data from KTB Oberfalz VB using multivariate statistical methods. // *Scientific Drilling*. – 1992. – Vol. 3. No. 1-3. – pp. 16-26.
27. Hansen J., Uroda A. Reinterpretation of Wire-line Log Data in the Eastern Galilee Basin, Queensland: Stratigraphical and Hydrogeological Implications. // *1st Australasian Exploration Geoscience Conference – Exploration Innovation Integration. ASEG Extended Abstract*. – 2018. – T. 1. – pp. 1-8. doi. org/10.1071/ASEG2018abT4_2H.
28. Interactive Petrophysics V3.6.// Online Help. Senergy Software Ltd. Scotland. – 2017.
29. Kumar M., Dasgupta R., SinghaD. K., Singh N. P. Petrophysical evaluation of well log data and rock physics modeling for characterization of Eocene reservoir in Chandmari oil field of Assam-Arakan basin, India. // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2018. – Vol. 8. – pp. 323-340.
30. McKellar J. L., Henderson R. A. Thomson Oregon – Galilee Basin. // *Geology of Queensland. Geological Survey of Queensland, Department of Natural Resources and Mines*. – Brisbane. – 2013. – pp. 196-203.
31. Mennan A. Well log interpretation and 3D reservoir property modeling of Maui-B field, Taranaki Basin, New Zealand. // *Masters Theses. Missouri University of science and technology*. – 2017. – 69 p.

32. Mukerji T., Avseth P., Mavko G., Takahashi I., Gonzalez E. F. Statistical rock physics: combining rock physics, information theory, and geostatistics to reduce uncertainty in seismic reservoir characterization. // *The Leading Edge*. – 2001. – Vol. 20 (3). – pp. 313-319.
33. Niculescu B. M., Ruse C. M., Gina A. Petrophysical, depositional environment and tectonic information obtained by integration of conventional and imaging borehole geophysical data. // *National Symposium of Geology and Geophysics "GEO 2015"*. – Bucharest. – 2015. – pp. 1-6.
34. Nishanth G., Aravindh N., Mahendran G., Venkatesh S. Application of conditioning, curve synthesizing and quality control of well log data's. // *International Journal of Advanced Research (IJAR)*. – 2019. – Vol. 7 (5). – pp. 4-11.
35. *Petrel Reservoir Engineering*. // *Traning and exercise guide*. – Schlumberger. – 2015. – 693 p.
36. Qicui L., Yisan L., Wenzhuan S., Peng Y., Change S., Hao G. Application of FMI imaging logging in shale gas formation of Sichuan basin. // *Petroleum Geology and Engineering*. – 2013. – Vol. 27. No. 6. – pp. 58-61.
37. Rider M. H. *The geological interpretation of well logs*. 2nd edition, revised.: Rider-French Consulting Ltd. – 2002.
38. *RMS 2012 User guide*. Roxar Software Solutions, 2012. – p. 3220.
39. Shahinpour A. Borehole image log analysis for sedimentary environment and clay volume interpretation. // *Norwegian University of Science and Technology*. – 2013. – p. 82
40. Shil Z., Luol P., Hao Y., Li G., Stumptner M., Hel Q., Quirchmayr G. Intelligent Technology for Well Logging Analysis. // *Intelligent information processing II*. – 2004. – pp. 373-382.
41. Simpson D. A. Logging While Drilling. // *Practical Onshore Gas Field Engineering*. – 2017. – pp. 85-134.
42. Spreckels V., Kamphans K., Hannemann W., Busch W. GIS-Einsatzim Monitoring bergbaubedingter Oberflaechenbewegungen. // *AGIT-Symposium. Volume: Angewandte Geoinformatik 2008*. – 2008. – pp. 572-577.
43. Stefan M. L. *Geological Well Logs: Their Use in Reservoir Modeling*. // Springer-Verlag. – Berlin: Heidelberg, 2001. – p. 385.
44. *Techlog Fundamentals. Workflow/Solutions Training Version 2015*. Software integrated Solutions, 2016. – p. 448.
45. Wei Y., Jinbo W., Shuai L., Kun W., Yinan Z. Logging identification for the Longmaxi mud shale reservoir on the Jiaoshiba area, Sichuan Basin. // *Natural Gas Industry. Sichuan*. – 2014. – Vol. 34 (6). – pp. 230-236.
46. *Well Evaluation. An integrated Well-Evaluation. Process for Shale Gas Reservoir*. // *User guide*. Schlumberger (US). – 2008. – 8p.
47. Xiaoling Z., Xiaolizhi, X. Ranhong, Heng W., Yang G. Petrophysical workflow for shale gas evaluation. // *Progress in Geophysics*. – 2013. – Vol. 28. – pp. 1962-1974.
48. Xin G., Han D. Lithology and fluid differentiation using rock physics templates. // *The Leading Edge*. – 2009. – Vol. 28 (1). – pp. 60-65.
49. Weidong Z., Min G., Zaixing J. Parameters and method for shale gas reservoir evaluation. // *Natural Gas Geoscience (in Chinese)*. – 2011. – Vol. 22. – pp. 1093-1099.

References

1. Aleksandrov B. L., Elzhaev A. S., Khasanov M. A., Germakhanova D. U. Substantiation of the limit of secondary porosity for the reservoir – non-reservoir boundary on the example of carbonate deposits of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas region. *Oil industry*. 2016. No. 3. pp. 44-48. (in Russ.)
2. Aleksandrov B. L., Khasanov M. A., Elzhaev A. S., Alekseev A. A. Stages of studying carbonate reservoirs of complex pore structure of the Upper Cretaceous deposits of the Eastern

Ciscaucasia. Interregional Pugwash Symposium. Abstracts of reports. Grozny, 2010. pp. 261-263. (in Russ.)

3. Afanasyev S.V. The technology of complex reinterpretation of well logging data when creating a three-dimensional geological model of a long-term developed deposit. *Oil industry*. 2002. No. 2. pp. 12-17. (in Russ.)

4. Afanasyev A.V., Afanasyev S.V., Ter-Stepanov V.V. Generalized model of electrical conductivity of terrigenous granular rock and the results of its testing. *Karotazhnik*. 2008. No. 12 (177). pp. 36-61. (in Russ.)

5. Afanasyev V.S. Directions of development of the scientific base of the technology of automated interpretation of logging materials at the present stage. *Karotazhnik*. 2008. No. 5 (170). pp. 102-112. (in Russ.)

6. Afanasyev V.S. The system of automated visual interpretation of the results of geophysical studies of wells Gintel. User manual. GIFTS LLC. Moscow. 2009. 1074 p. (in Russ.)

7. Afanasyev V.S., Afanasyev S.V. Development of technology for automated interpretation of well logging data – the basis for creating a permanent geological and technological model of hydrocarbon deposits. Innovative technologies in the field of prospecting, exploration and detailed study of oil and gas fields. Materials of the scientific and practical conference. Moscow. TsGE, 2002. pp. 103-107. (in Russ.)

8. Batashov M.V. Features of the petrophysical characteristics of the Lower Cretaceous deposits of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas region according to geological and geophysical data. *Geology in the developing world: VI scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation*. 2013. Vol. 2. pp. 134-136. (in Russ.)

9. Bulaeva N.M., Gairabekov I.G., Kerimov I.A., Mintshev M. Sh., Ezirbaev T.B. Development of geoinformation technologies for complex monitoring of natural resources of the Chechen Republic. *Monitoring. Science and technology*. 2020. No. 4 (46). pp. 48-55. (in Russ.)

10. Gatsaeva S.S.A., Khasanov M.A., Chimaeva Kh. R. History of geological and geophysical study of the Paleozoic deposits of the Eastern Ciscaucasia. *History of Science and Technology*. 2012. No. 7. pp. 45-48. (in Russ.)

11. Dakhkilgov T.D., Demushkina N.V. Petrophysical substantiation of methods for interpreting data from geophysical studies of deposits in the Chechen-Ingush Autonomous Soviet Socialist Republic. *Neftegazovaya Geologiya i Geofizika*. 1982. No. 12. pp. 20-22. (in Russ.)

12. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Shempelev A.G. Signs of the geodynamic setting and elements of structural-material complexes of the Central Caucasus on the DEEP section of the Genaldon profile. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2018. No. 4. Vol. 8. pp. 58-74. (in Russ.)

13. Kerimov I.A., Petrov A.V., Abubakarova E.A. Application of the “Koskad 3D” software package for the analysis of potential fields of the Terek-Caspian trough. *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 2018. No. 3. Vol. 12. pp. 88-96. (in Russ.)

14. Kerimov I.A., Ezirbaev T.B., Elzhaev A.S. Analysis of methods for identifying reservoirs in the Albian-Aptian sediments of the Tersko-Sunzhenskaya oil and gas region. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 28-37. (in Russ.)

15. Kuznetsov O.L., Chirkin I.A., Tverdokhlebov L.I., Elzhaev A.S., Rizanov E.G., Koligaev S.O., Yurov A.A., Vyushkina M.V. Innovative technologies of seismic prospecting for the revival of old oil-producing regions of Russia. *Business magazine Neftegaz. RU*. 2020. No. 4 (100). pp. 68-75. (in Russ.)

16. Levin D. Trends. *Geology and Geophysics. Oil & Gas Journal Russia*. 2018. No. 8 (28). 35 p. (in Russ.)

17. Rybnikov A.V., Volk E.P. Gintel – interpretation of well logging data for solving problems of detailed geological and geomechanical modeling. Integrated modeling and assessment of oil and gas assets in conditions of uncertainty. XVII Conference of users of software and technological solutions of Roxar, Russia and CIS countries... Sochi, 2017. 35 p. (in Russ.)

18. FGU "GKZ". Methodical recommendations on the composition and rules of registration of materials submitted for state examination on feasibility studies of conditions for calculating reserves of mineral deposits. Recommended by the protocol of 03.04.2007. No. 11-17. 0044-pr. Moscow, 2007. 43 p. (in Russ.)
19. Shnurman I. G. Model of Pliocene-Miocene terrigenous reservoirs of the Western Ciscaucasia. *Karotazhnik*. 2011. No. 7 (205). pp. 65-72. (in Russ.)
20. Shumilov A. V. Analysis of existing and development of new software systems for processing and interpreting information about geophysical well surveys. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and gas and mining*. 2019. Vol. 19. No. 2. pp. 162-174. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.6. (in Russ.)
21. Elzhaev A. S. The history of the study of fractured reservoirs of the Upper Cretaceous deposits of the western part of the Terek-Caspian trough. Institute of the History of Natural Science and Technology named after V. I. S. I. Vavilova. Annual Scientific Conference, 2019. pp. 471-473. (in Russ.)
22. Elsunkaeva E. V. On the use of WEB-GIS technologies for monitoring environmental changes during the exploitation of geothermal deposits. *GEOTECHNOLOGIES OF THE XXI CENTURY. / Materials of the All-Russian scientific-practical conference dedicated to the 100th anniversary of FSBEI HE "GGNTU im. acad. M. D. Millionshchikova*. 2017. pp. 202-207. (in Russ.)
23. Baoquan Q., Xiaobing Y., Shudong Z., Zhen C. Shale gas reservoirs evaluation with logging data in the south of Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 2011. Vol. 31. pp. 44-47.
24. Bayrak A, 2010, ATP 984 – Galilee Basin, Queensland: QER Solomon-1 & 1A Exploration Core Wells, Well Completion Report. Queensland Energy Resources, Brisbane. Unpublished company report held by the Geological Survey of Queensland QDEX Reports System as CR 64794.
25. DEEDI. Queensland petroleum geoscience and wireline log data July. Geological Survey of Queensland, Department of Employment, Economic Development and Innovation, 2011. 280 p.
26. Eberle D. Interpretation of multi-method geophysical borehole logging data from KTB Oberfalz VB using multivariate statistical methods. *Scientific Drilling*, 1992. Vol. 3. No. 1-3. pp. 16-26.
27. Hansen J., Uroda A. Reinterpretation of Wire-line Log Data in the Eastern Galilee Basin, Queensland: Stratigraphical and Hydrogeological Implications. 1st Australasian Exploration Geoscience Conference – Exploration Innovation Integration. ASEG Extended Abstracts, 2018. No. 1. pp. 1-8. doi. org/10.1071/ASEG2018abT4_2H.
28. Interactive Petrophysics V3.6. Online Help. Senergy Software Ltd. Scotland. 2017.
29. Kumar M., Dasgupta R., Singha D. K., Singh N. P. Petrophysical evaluation of well log data and rock physics modeling for characterization of Eocene reservoir in Chandmari oil field of Assam-Arakan basin, India. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018. Vol. 8. pp. 323-340.
30. McKellar J. L., Henderson R. A. Thomson Oregon – Galilee Basin. *Geology of Queensland*. Geological Survey of Queensland, Department of Natural Resources and Mines. Brisbane. 2013. pp. 196-203.
31. Mennan A. Well log interpretation and 3D reservoir property modeling of Maui-B field, Taranaki Basin, New Zealand. Masters Theses. Missouri University of science and technology, 2017. 69 p.
32. Mukerji T., Avseth P., Mavko G., Takahashi I., Gonzalez E. F. Statistical rock physics: combining rock physics, information theory, and geostatistics to reduce uncertainty in seismic reservoir characterization. *The Leading Edge*, 2001. Vol. 20 (3). pp. 313-319.
33. Niculescu B. M., Ruse C. M., Gina A. Petrophysical, depositional environment and tectonic information obtained by integration of conventional and imaging borehole geophysical data. National Symposium of Geology and Geophysics "GEO 2015". Bucharest. 2015. pp. 1-6.
34. Nishanth G., Aravindh N., Mahendran G., Venkatesh S. Application of conditioning, curve synthesizing and quality control of well log data's. *International Journal of Advanced Research (IJAR)*. 2019. Vol. 7 (5). pp. 4-11.

35. Petrel Reservoir Engineering. Training and exercise guide. Schlumberger, 2015. 693 p.
36. Qicui L., Yisan L., Wenzhuan S., Peng Y., Change S., Hao G. Application of FMI imaging logging in shale gas formation of Sichuan basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 2013. Vol. 27. No. 6. pp. 58-61.
37. Rider M. H. The geological interpretation of well logs. 2nd edition, revised. Rider-French Consulting Ltd., 2002.
38. RMS 2012 User guide. Roxar Software Solutions, 2012. p. 3220.
39. Shahinpour A. Borehole image log analysis for sedimentary environment and clay volume interpretation. Norwegian University of Science and Technology, 2013. 82 p.
40. Shil Z., Luol P., Hao Y., Li G., Stumptner Markus, Hel Q., Quirchmayr G. Intelligent Technology for Well Logging Analysis. Intelligent information processing II. 2004. pp. 373-382.
41. Simpson D.A. Logging While Drilling. Practical Onshore Gas Field Engineering, 2017. pp. 85-134.
42. Spreckels V., Kamphans K., Hannemann W., Busch W. GIS-Einsatzim Monitoring bergbaubedingter Oberflaechenbewegungen. AGIT-Symposium. Volume: Angewandte Geoinformatik, 2008. pp. 572-577.
43. Stefan M. L. Geological Well Logs: Their Use in Reservoir Modeling. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg, 2001 p.
44. Techlog Fundamentals. Workflow/Solutions Training Version 2015. Software integrated Solutions, 2016. 448 p.
45. Wei Y., Jinbo W., Shuai L., Kun W., Yinan Z. Logging identification for the Longmaxi mud shale reservoir on the Jiaoshiba area, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry. Sichuan*, 2014. Vol. 34 (6). pp. 230-236.
46. Well Evaluation. An integrated Well-Evaluation. Process for Shale Gas Reservoir. User guide. Schlumberger (US), 2008. 8 p.
47. Xiaoling Z., Xiaolizhi, X. Ranhong, Heng W., Yang G. Petrophysical workflow for shale gas evaluation. *Progress in Geophysics*, 2013. Vol. 28. pp. 1962-1974.
48. Xin G., Han D. Lithology and fluid differentiation using rock physics templates. *The Leading Edge*, 2009. Vol. 28 (1). pp. 60-65.
49. Weidong Z., Min G., and Zaixing J. Parameters and method for shale gas reservoir evaluation. *Natural Gas Geoscience (in Chinese)*, 2011. Vol. 22. pp. 1093-1099.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 550.814

DOI: 10.46698/VNC. 2021.62.10.010

Оригинальная статья

Анализ пространственного распределения химических элементов апатит-штафелитовых руд

И. И. Босиков ¹, Р. В. Ключев ², М. В. Текиев ¹

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44;

²Московский политехнический университет, Россия, 107203, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Статья поступила: 06.05.2021, доработана: 21.05.2021, принята к публикации: 03.06.2021

Резюме: Актуальность работы. Важным и перспективным источником сырья для производства фосфатного концентрата являются апатит-штафелитовые руды. Критерием оценки апатит-штафелитовых руд является, прежде всего – содержание полезных компонентов – P_2O_5 и $Fe_{общ}$. Вопросы гранулометрического и минерального состава апатит-штафелитовых руд, состава извлекаемых минералов – штафелита, апатита, магнетита, их влияние на технологические показатели, в конечном итоге – вопросы геолого-технологической типизации руд. Таким образом, назревает актуальный вопрос геолого-технологического картирования месторождения. **Цель исследований:** провести анализ пространственного распределения химических элементов, химический анализ и морфотектонический анализ в пределах Северного участка Ковдорского месторождения. **Методы исследований.** Статистическая обработка результатов химического анализа, химический анализ проб, метод обратно взвешенных расстояний, морфоструктурный анализ. **Результаты исследований.** Для анализа пространственных закономерностей распределения химических элементов на основе данных химического анализа проб из скважин были составлены выборки, включающие в себя показатели значений содержаний элементов либо в горизонтальной плоскости (на различных горизонтах), либо в вертикальной плоскости (в разведочных профилях). В итоге авторами было составлено 6 выборок характеризующие: горизонт 290 м, горизонт 270 м, горизонт 250 м, а также разведочные профили 16, 17, 18. В научно-исследовательской работе произведен анализ пространственного распределения химических элементов в пределах Северного участка Ковдорского месторождения. В ходе изучения анализа выявлены характерные особенности распространения P_2O_5 , которые выражаются в приуроченности данного оруденения к сочетанию тектонического нарушения исследуемого участка и к карбонатитовому штокверку.

Ключевые слова: апатит-штафелитовые руды, химический анализ проб, анализ пространственного распределения, геокартирование, разведочные профили, метод обратно взвешенных расстояний.

Для цитирования: Босиков И. И., Ключев Р. В., Текиев М. В. Анализ пространственного распределения химических элементов апатит-штафелитовых руд. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.62.10.010.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

DOI: 10.46698/VNC. 2021.62.10.010

Original paper

Analysis of spatial distribution of chemical
elements of apatite-stafelite oreI. I. Bosikov ¹, R. V. Klyuev ², M. V. Tekiev ¹¹North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation;²Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya Str., Moscow 107203,
Russian Federation, e-mail: kluev-roman@rambler. ru

Received: 06.05.2021, revised: 21.05.2021, accepted: 03.06.2021

Abstract: Relevance. An important and promising source of raw materials for the production of phosphate concentrate are apatite-shafelite ores. The criterion for evaluating apatite-stafelite ores is, first of all, the content of useful components – P₂O₅ and Fe₂O₃. Issues of granulometric and mineral composition of apatite-stafelite ores, composition of recoverable minerals – stafelite, apatite, magnetite, their influence on technological indicators, and ultimately – issues of geological and technological typification of ores. Thus, the urgent issue of geological and technological mapping of the field is brewing. **Aim:** to analyze the spatial distribution of chemical elements, chemical analysis and morphotectonic analysis within the Northern section of the Kovdorskoye field. **Methods.** Statistical processing of chemical analysis results, chemical analysis of samples, inverse distance weighted method, morphostructural analysis. **Results.** To analyze the spatial patterns of the distribution of chemical elements, based on the data of chemical analysis of samples from wells, samples were compiled, including indicators of the values of the contents of elements either in the horizontal plane (at different horizons) or in the vertical plane (in exploration profiles). As a result, the authors compiled 6 samples characterizing: horizon 290 m, horizon 270 m, horizon 250 m, as well as exploration profiles 16, 17, 18. In the research work, the analysis of the spatial distribution of chemical elements within the Northern section of the Kovdorskoye field was carried out. During the study of the analysis, the characteristic features of the distribution of P₂O₅ were revealed, which are expressed in the confinement of this mineralization to a combination of tectonic disturbance of the study area and to a carbonatite stockwork.

Keywords: apatite-shafelite ores, chemical analysis of samples, analysis of spatial distribution, geo-mapping, exploration profiles, inverse distance weighted method.

For citation: Bosikov I. I., Klyuev R. V., Tekiev M. V. Analysis of spatial distribution of chemical elements of apatite-stafelite ore. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): ... – DOI: 10.46698/VNC. 2021.62.10.010.

Введение

Важным и перспективным источником сырья для производства фосфатного концентрата являются апатит-штаффелитовые руды [Туголуков и др., 2011, 2012]. Критерием оценки апатит-штаффелитовых руд является, прежде всего – содержание полезных компонентов – P₂O₅ и Fe_{общ}. Вопросы гранулометрического и минерального состава апатит-штаффелитовых руд, состава извлекаемых минералов – штаффелита, апатита, магнетита, их влияние на технологические показатели обогащения (в конечном итоге – вопросы геолого-технологической типизации руд). Таким образом, уже сегодня назревает вопрос геолого-технологического картирова-

ния месторождения [Босиков и др., 2021; Голик и др., 2018, 2019, 2020; Заалишвили и др., 2018; Хулелидзе и др., 2016; Чотчаев и др., 2020, 2021; Ganapathy et al., 2020; Klyuev и др., 2020; Svalova et al., 2019].

В приповерхностной части карбонатитового штока, на апатитовых карбонатах развита обогащенная фосфатами кора выветривания, представляющая собой остаточное апатит-штаффелитовое месторождение. Формирование его связано с выщелачиванием кальцита из апатитовых карбонатитов (0,5-5,5% P_2O_5), переотложением апатита и образованием штаффелита, вермикулита, гематита и глинистых минералов.

Кора выветривания имеет линейно-площадной характер: на компактных крупных элементах штокверка, занимающих значительную площадь, формируются пластообразные залежи с переменной мощностью (от нескольких метров до 100 и более метров). Жилообразные тела апатитовых карбонатитов преобразованы процессом выветривания в апатит-штаффелитовую руд на всем протяжении, как по простиранию, так и по падению, на глубину от 30 м до 100-150 м (профили 4, 8, 10^A, 14 и др.). Характерными для месторождения формами рудных залежей являются чашеобразные («котловинные», по Б. И. Сулимову) структуры, расположенные в западном, юго-западном, юго-восточном и восточном секторах карбонатитовой дуги.

Размеры этих «котловин» по простиранию (длина) варьирует от 200 м до 500 м, по ширине – от 130-150 м до 250-300 м, по глубине (что адекватно мощностям рудных залежей) – от 30-110 м до 150-160 м (профили 3¹, 3², 4, 4², 9, 14¹, 15¹, 17).

Котловинные структуры разделены участками пережимов, где отмечаются 1-2, иногда до 3, сравнительно маломощных соединяющих рукавов. Как правило, на участках пережимов в более удаленных от котловин участках подошва залежи приближается к дневной поверхности (глубина проникновения и распространения руды уменьшается).

В результате чего на участках пережимов залежь теряет сплошность и свою подковообразную форму, распадаясь на отдельные узлы, стягивающиеся к участкам котловин уже с глубины 20-30 и более метров в соответствующих горизонтальных сечениях.

Границы залежи и составляющих ее отдельных тел на контакте с родоначальными первичными карбонатитами, как правило, извилистые, причем карбонатиты и штаффелитовые руды всегда разделены зоной дезинтегрированных и активно выщелачиваемых карбонатов, мощность которой может колебаться от первых метров до нескольких десятков метров. Контакты штаффелитовых руд с дезинтегрированными карбонатитами всегда резкие, но в эндоконтактной зоне могут присутствовать реликты дезинтегрированных карбонатитов.

Границы штаффелитовых руд с боковыми силикатными породами – фенитами и фенитизированными гнейсами, амфиболитами и щелочными породами ийолит-мельтейгит-твейтозитового состава определяются характером границ родоначальных карбонатитов. Резкие и четкие контакты карбонатитов с вмещающими породами наследуются и штаффелитовыми рудами. Если же переход к вмещающим породам происходит через штокверковую зону (систему прожилков), последние имеют место также и в штаффелитовом горизонте.

Внутреннее строение апатит-штаффелитовых залежей определяется:

1) наличием и концентрацией включений кондиционных по содержанию пяти-окиси фосфора пород внутри общего контура.

2) различиями в составе самих кондиционных руд, формой, размерами и условиями залегания отдельных разновидностей.

Включения некондиционных пород в промышленном контуре распространены достаточно широко. В среднем по месторождению некондиционные участки составляют 20% от объема залежи. Эта величина не учитывает еще множество мелких включений имеющих некондиционную мощность и идущих при подсчете на разубоживание руды.

Некондиционные включения представлены теми породами, с которыми залежь граничит на каждом конкретном участке: фенитами, фенитизированными гнейсами, амфиболитами, твейтозитами, ийолит-мельтейгитами, полностью сохраняющими силикатную часть своего состава, а также текстурно-структурные особенности. Форма включений силикатных пород внутри рудной зоны унаследует от коренных карбонатитов [Бембель, 2017; Бронскова, 2016; Костеневич и др., 2017].

Площадь юго-западного рудного узла с поверхности почти полностью закрыта чехлом четвертичных отложений различной мощности.

В восточной части площади развиты водно-ледниковые отложения, сложенные валунно-гравийно-галечным материалом с разнозернистым песчаным заполнителем и линзами супесчаного и суглинистого состава. Мощность их варьирует от нескольких метров до 35 м.

На остальной площади, в центральной и западной частях месторождения, на водоразделе и склонах горы Пилькома-Сельга распространены элювиально-делювиальные отложения щебнисто-валунно-глыбового состава с песчано-дресвяным и супесчаным заполнителем. Мощность их составляет 1-5 м.

Кроме того, на участке присутствуют современные техногенные отложения, представленные в западной части отвалом №2, в северной – складом апатит-штаффелитовой руды, состоящими из глыбово-щебнистого материала с дресвяно-супесчаным и песчаным заполнителем.

С южной стороны к участку примыкает хвостохранилище, сложенное отходами обогащения бадделеит-apatит-магнетитовых руд обогатительных фабрик ОАО «Ковдорский ГОК» [Земцовская, 2016], состоящими из мелкозернистых пылеватых песков.

Целью исследований является провести анализ пространственного распределения химических элементов в пределах исследуемого участка.

Методика исследования. Статистическая обработка результатов химического анализа, химический анализ проб, метод обратно взвешенных расстояний, морфо-структурный анализ.

Техническая часть. Исходными данными для характеристики породы явились пробы, отобранные из скважин. По пробам проведен химический анализ с определением: FeO, P₂O₅, CaO, CO₂, MgO, ZrO₂, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃. Всего проанализировано 339 проб из 22 скважин. Пример таблицы с исходными данными опробования и результатами химического анализа проб приведен в таблице 1.

На основе данных статистического анализа, проведенных по основным элементам (рис. 1, 2, 3, 4.), можно сделать следующие выводы:

Гистограммы показывают логнормальный закон распределения у FeO, P₂O₅, ZrO₂ и Fe₂O₃. При этом из гистограммы P₂O₅ (рис. 2) видно, что при логнормальном распределении наблюдается отрицательное смещение, максимальное количество проб находится за пределами бортового содержания (180 проб) для данного элемента, и варьируется в пределах 0-5%. Так же отрицательное смещение наблюдается на гистограмме Fe₂O₃ (рис. 4).

Таблица 1 / Table 1

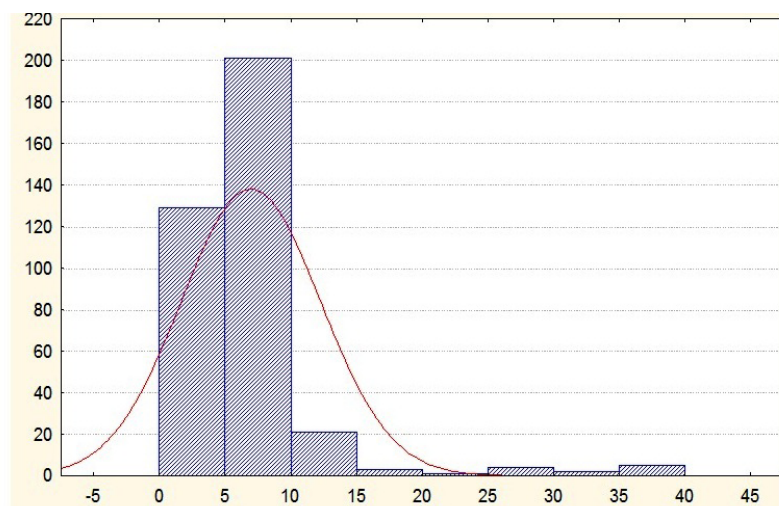
**Исходные данные опробования и результаты химического анализа проб /
Initial sampling data and results of chemical analysis of samples**

№ скв / Well number	X	Y	Z	FeO	P ₂ O ₅	CaO	CO ₂	MgO	ZrO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
17p	-1741,10	-2096,70	300,45	4,47	6,18	20,44	0,77	9,50	0,03	44,78	6,89	6,51
17p	-1741,10	-2096,70	296,40	3,69	8,49	19,46	0,99	13,80	0,02	34,60	8,45	5,67
17p	-1741,10	-2096,70	293,40	3,69	10,74	24,50	1,87	13,80	0,02	34,60	8,45	5,67
17p	-1741,10	-2096,70	289,80	3,97	7,15	17,36	0,88	13,80	0,02	34,60	8,45	5,67
17p	-1741,10	-2096,70	285,30	5,70	5,51	18,26	0,88	7,80	0,03	44,18	7,80	8,30
17p	-1741,10	-2096,70	281,40	10,83	18,63	27,30	1,54	8,20	0,03	15,54	5,72	14,80
17p	-1741,10	-2096,70	277,35	3,35	5,25	43,68	29,04	4,30	0,01	8,14	2,34	4,72
17p	-1741,10	-2096,70	271,45	3,18	6,69	36,40	20,68	5,20	0,02	12,70	3,77	5,04
17p	-1741,10	-2096,70	264,75	3,69	4,73	42,42	27,39	5,20	0,02	12,70	3,77	5,04
17p	-1741,10	-2096,70	258,55	4,80	0,63	6,44	0,88	4,00	0,02	55,16	14,43	7,46
18п	-1635,40	-2134,50	298,3	12,24	20,20	29,42	2,93	2,22	0,28	10,03	5,75	15,44
18п	-1635,40	-2134,50	294,3	8,92	26,10	38,99	3,65	2,22	0,28	10,03	5,75	15,44
18п	-1635,40	-2134,50	291,1	18,53	16,25	24,05	2,21	3,41	0,12	8,78	4,25	34,78
18п	-1635,40	-2134,50	287,3	29,11	17,20	25,45	2,50	3,41	0,12	8,78	4,25	34,78
18п	-1635,40	-2134,50	282,65	35,49	8,20	12,62	1,82	5,28	0,35	10,86	3,44	47,94
18п	-1635,40	-2134,50	279,2	27,98	13,05	19,15	2,26	5,28	0,35	10,86	3,44	47,94
18п	-1635,40	-2134,50	275,05	38,64	2,75	4,49	1,34	12,00	0,68	16,25	2,88	57,12
18п	-1635,40	-2134,50	269,55	32,17	0,89	2,24	1,30	12,00	0,68	16,25	2,88	57,12
18п	-1635,40	-2134,50	264,05	38,03	1,74	3,65	1,13	12,00	0,68	16,25	2,88	57,12
18п	-1635,40	-2134,50	258,55	38,03	3,24	5,89	1,55	12,94	0,34	15,83	2,50	53,48
18п	-1635,40	-2134,50	253,05	5,94	1,25	8,13	1,03	12,94	0,34	15,83	2,50	53,48
18п	-1635,40	-2134,50	247,55	36,89	3,18	6,45	2,26	12,94	0,34	15,83	2,50	53,48
18п	-1635,40	-2134,50	243,05	26,40	10,65	17,38	2,26	9,00	0,24	14,76	3,31	37,24
18п	-1635,40	-2134,50	239,35	7,03	3,35	14,44	1,27	9,25	0,05	44,92	7,06	10,31
18п	-1635,40	-2134,50	235,9	7,03	2,66	17,67	1,18	9,25	0,05	44,92	7,06	10,31
18п	-1635,40	-2134,50	232,4	3,60	8,30	17,38	1,93	11,13	0,04	37,38	8,31	5,23
18п	-1635,40	-2134,50	228,4	6,82	3,20	15,98	6,39	13,06	0,01	34,31	7,81	8,58
18п	-1635,40	-2134,50	224,6	5,67	2,85	13,46	4,04	13,06	0,01	34,31	7,81	8,58

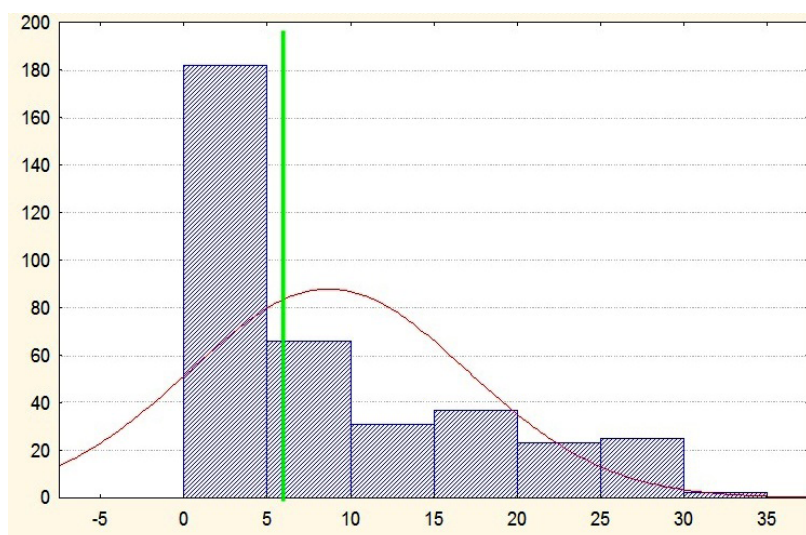
Результаты исследований

Для анализа пространственных закономерностей распределения химических элементов на основе данных химического анализа проб из скважин были составлены выборки, включающие в себя показатели значений содержаний элементов либо в горизонтальной плоскости (на различных горизонтах), либо в вертикальной плоскости (в разведочных профилях). В итоге авторами было составлено 6 выборок характеризующие: горизонт 290 м, горизонт 270 м, горизонт 250 м, а также разведочные профили 16, 17, 18.

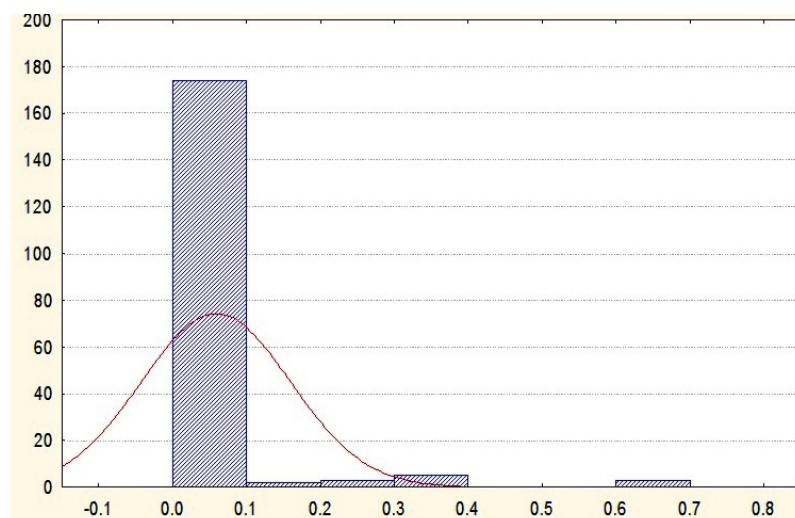
Карты распределения химических элементов построены в программе ArcGis 9.3.1 при помощи модуля Geostatistical Analyst методом обратно взвешенных расстояний (ОВР) [Лебедев и др., 2013; Zhukovskiy et al., 2019].



*Рис. 1. Гистограмма FeO /
Fig. 1. Bar graph FeO*



*Рис. 2. Гистограмма P₂O₅ /
Fig. 2. Bar graph P₂O₅*



*Рис. 3. Гистограмма ZrO₂ /
Fig. 3. Bar graph ZrO₂*

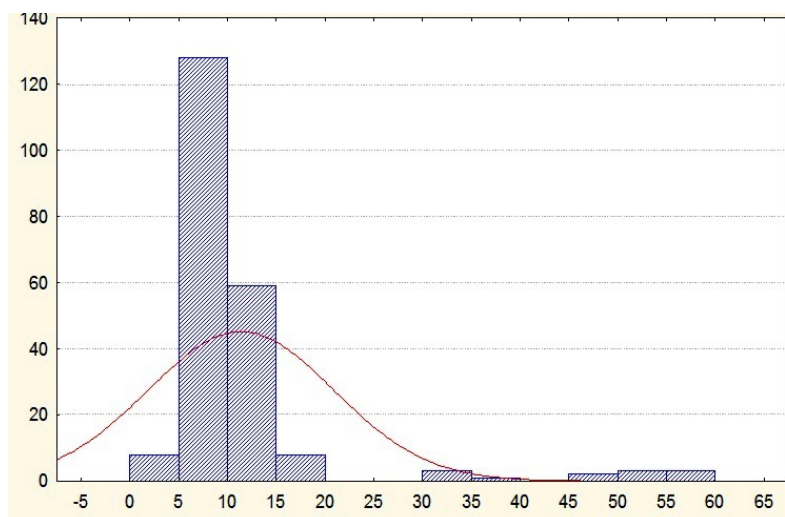


Рис. 4. Гистограмма Fe_2O_3 /
Fig. 4. Bar graph Fe_2O_3

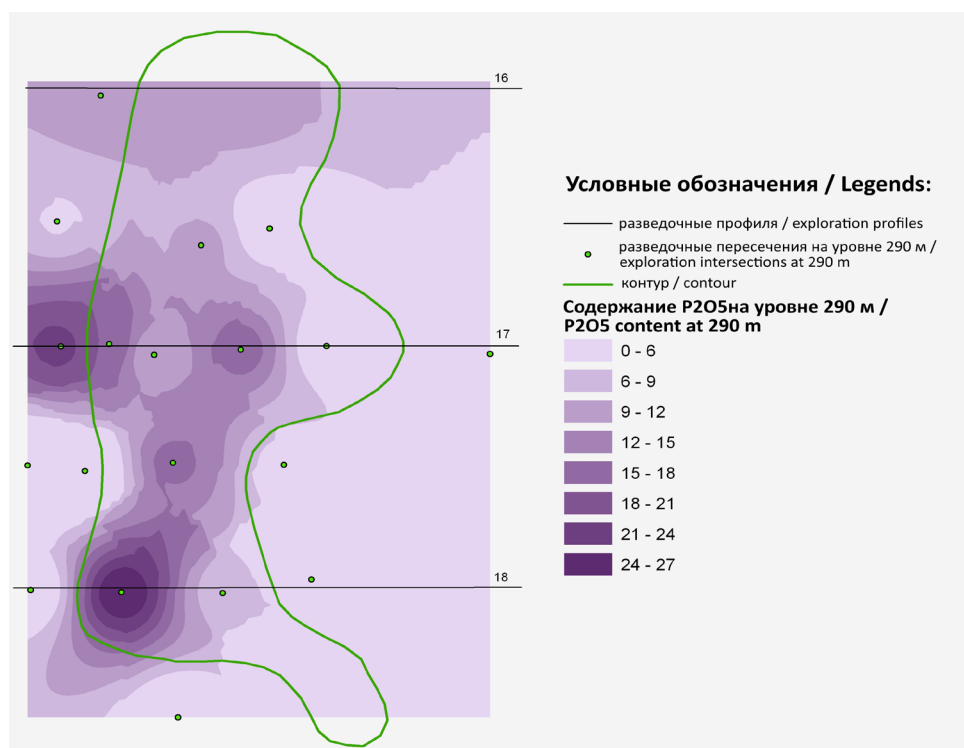
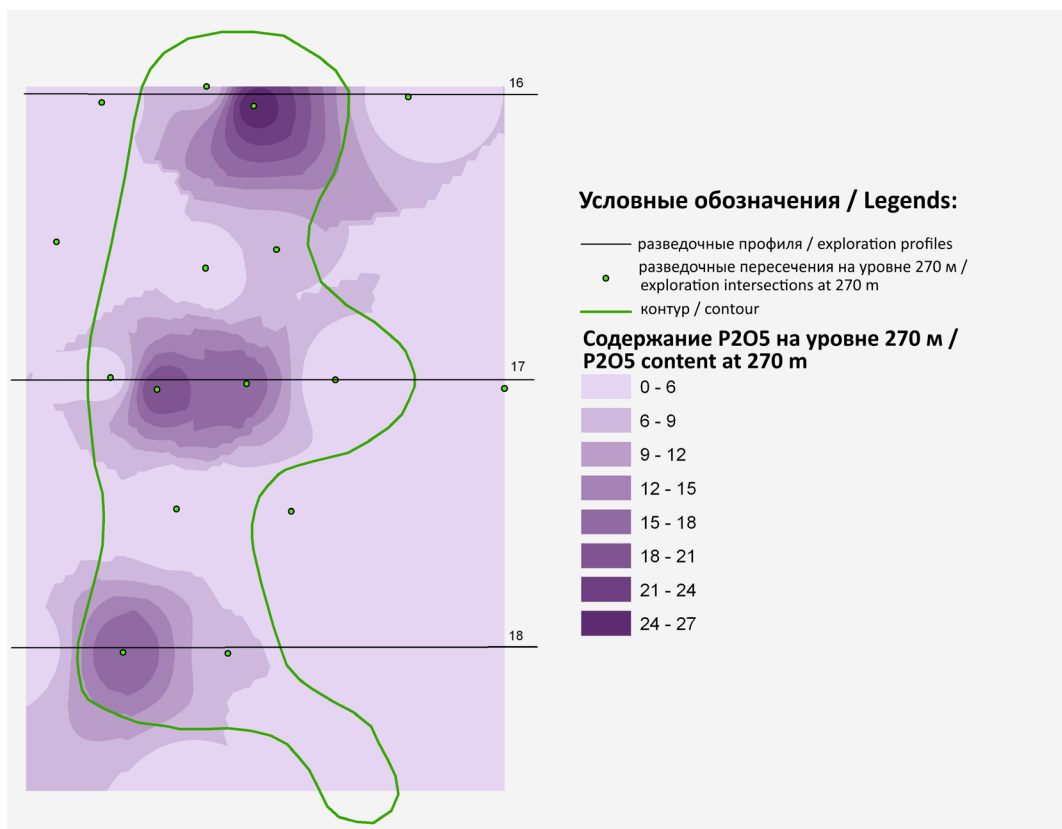
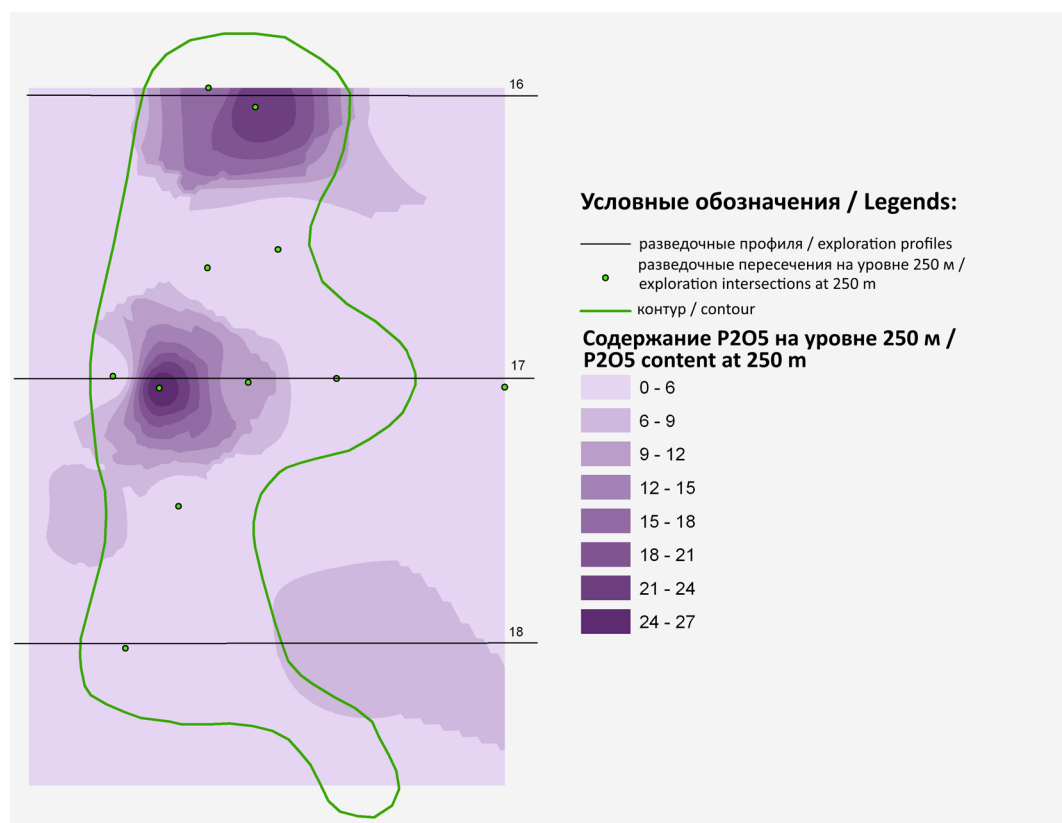


Рис. 5. Карта распределения P_2O_5 на горизонте 290 м /
Fig. 5. P_2O_5 distribution map at 290 m horizon

Метод ОВР учитывает вес окружающих измеренных значений для того, чтобы определить расчетное значение для ячейки, в которой не было данных. При этом учитываются не только расстояния от интерполируемой точки, но и расстояния между самими исходными точками так, что веса более близких друг к другу исходных точек уменьшаются.

Были построены и проанализированы карты и разрезы по профилям для четырех основных элементов (FeO , P_2O_5 , ZrO_2 , Fe_2O_3), главным из которых является P_2O_5 , так как это и есть полезное ископаемое, разведка которого и проводится в данном проекте. Карты и разрезы для P_2O_5 приведены ниже (рис. 5, 6, 7, 8, 9, 10.).

*Рис. 6. Карта распределения P_2O_5 на горизонте 270 м /**Fig. 6. P_2O_5 distribution map at 270 m horizon**Рис. 7. Карта распределения P_2O_5 на горизонте 250 м /**Fig. 7. P_2O_5 distribution map at 250 m horizon*

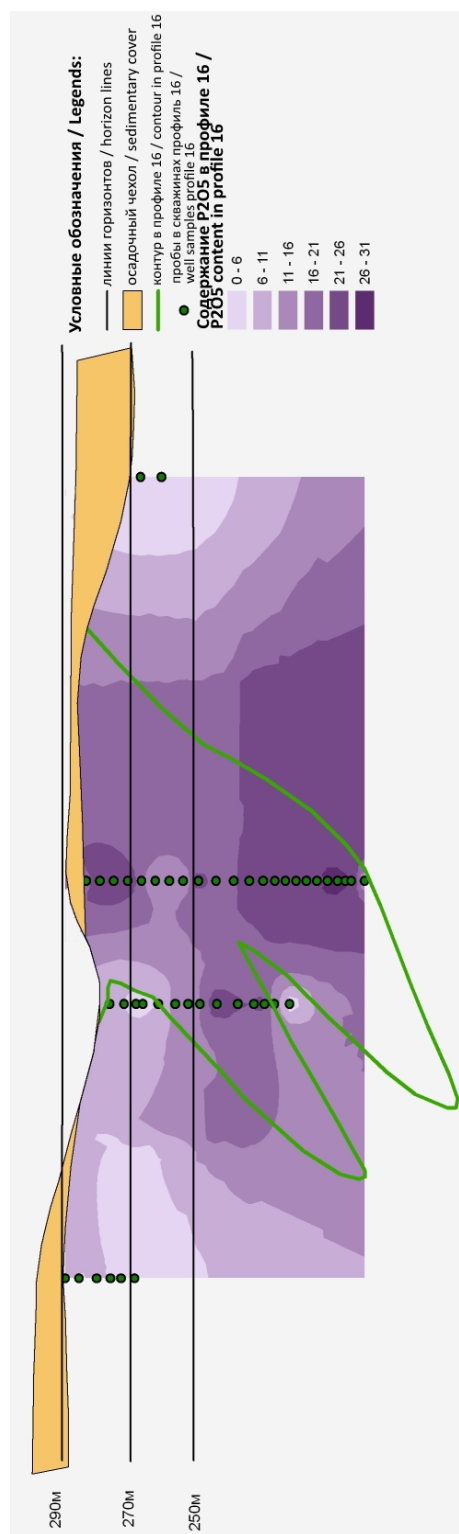


Рис. 8. Карта распределения P_2O_5 в проектном профиле 16 /
Fig. 8. P_2O_5 distribution map in project profile 16

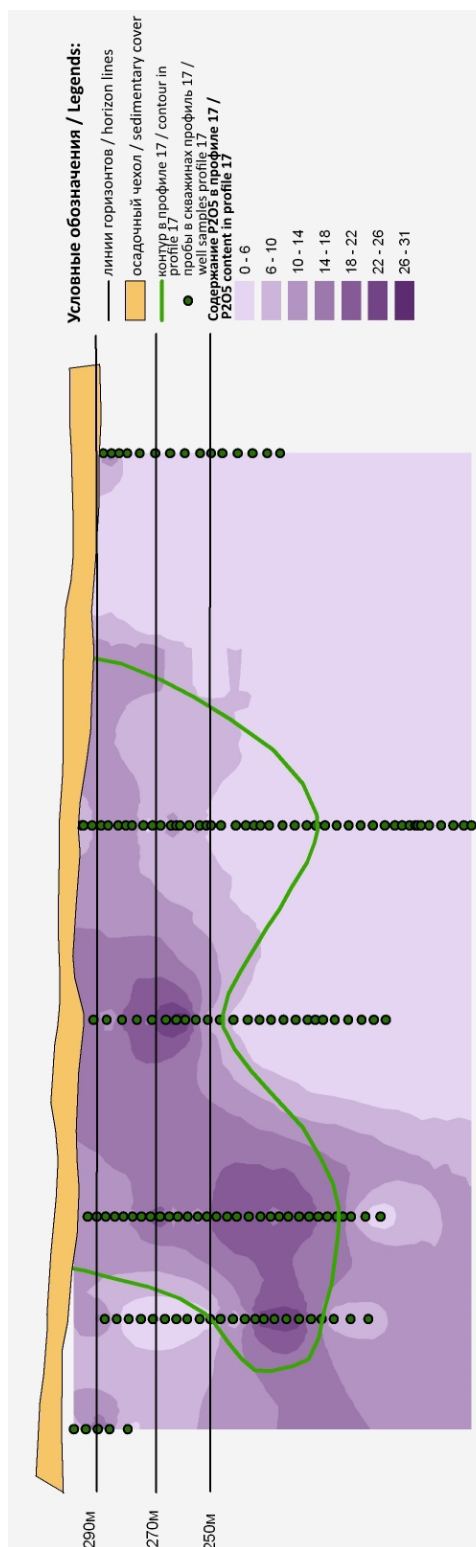


Рис. 9. Карта распределения P_2O_5 в проектном профиле 17 /
Fig. 9. P_2O_5 distribution map in project profile 17

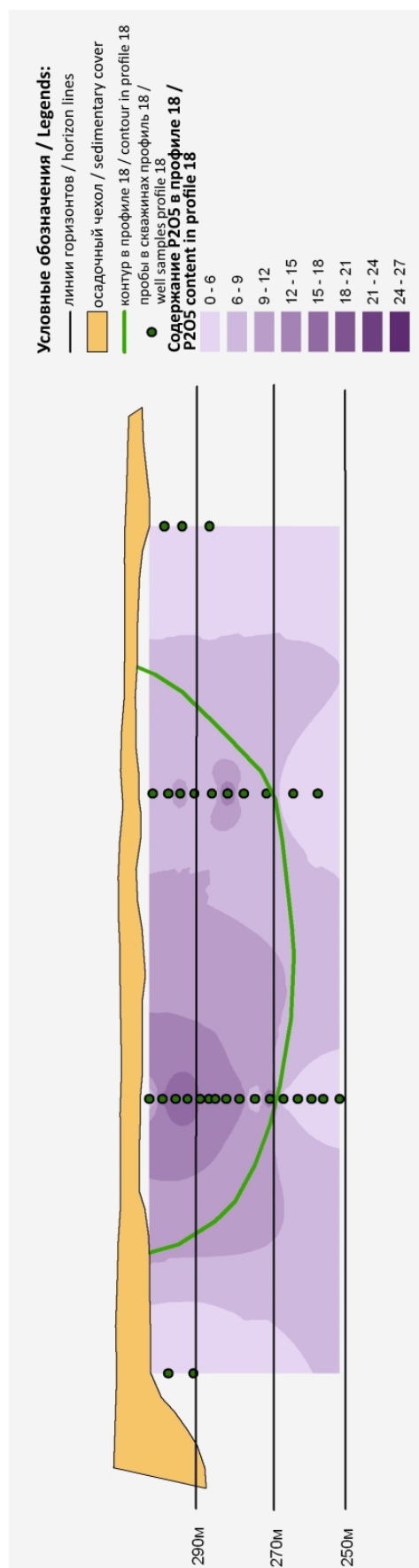


Рис. 10. Карта распределения P_2O_5 в проектном профиле 18 /
Fig. 10. P_2O_5 distribution map in project profile 18

Заключение

Анализируя карты распределения P_2O_5 на различных горизонтах, можно сделать следующие выводы:

- залежь носит узловой характер, мощности тела полезного ископаемого не выдержаны, так же не выдержаны и содержания P_2O_5 в пределах рудного тела. Узловой характер залежи подтверждается и 3 группой сложности. С глубиной содержания P_2O_5 снижаются до забортовых;

- наиболее богатыми по содержанию P_2O_5 являются центральная и северная части участка. Но высокие значения в центральной части прослеживаются уже с уровня 290 м, а в северной части область высоких значений более заметно на уровне 270 м;

- богатые содержания в центральной и северной частях сохраняются с глубиной и имеют тенденцию смещения на запад;

- южная часть участка работ характеризуется высокими значениями содержания на верхних уровнях, а с глубиной эти значения понижаются до забалансовых.

Данные карты распределения имеют практический характер, непосредственно, они будут играть не последнюю роль при проведении блокировки запасов.

Из анализа карт распределения по проектным профилям вытекает следующее:

- наиболее высокими значениями содержания P_2O_5 характеризуются профили 16 и 17;

- из профиля 18 следует, что руды в данной части участка являются, в большинстве своем, рядовыми.

Данные карты распределения, построенные в разведочных профилях, играют огромную роль в обосновании увязки расположения рудного тела, так как на полученных разрезах, построенных по результатам ранее проведенных работ, более богатые участки руд нарисованы в виде крутопадающих зон. В то же время, возможен вариант увязки этих зон в виде тела, ориентированного под углом 45° . И именно такая морфология и подтверждается в построенных разрезах (рис. 9.). Такая морфология также может быть подтверждена ориентировкой тектонических зон, показанных на карте и разрезах, по которым могла происходить циркуляция гидротермальных растворов, приведших к обогащению.

Следовательно, для выяснения особенностей внутреннего строения рудоносной залежи, необходимо получить перекрытый разрез посредством бурения наклонных скважин.

Так же эти карты позволяют определить глубины залегания и масштабы участков с наиболее высокими содержаниями полезного компонента, что весьма полезно при блокировке запасов.

Аналогичные исследования проводились и в странах дальнего зарубежья [De Oliveira et al., 2014; Elshkaki et al., 2017; Ghorbani et al., 2016; Sebutsoe et al., 2017; Sinclair et al., 2015; Song et al., 2017].

Литература

1. Бембель Р. М., Сухов Л. А., Щетинин И. А. Пути повышения геологической эффективности освоения месторождений углеводородов в Западной Сибири. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – № 6. – С. 6-10. DOI: 10.31660/0445-0108-2017-6-6-10

2. Босиков И. И., Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Ажмухамедов И. М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – № 1. – С. 77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.
3. Босиков И. И., Ключев Р. В., Гаврина О. А. Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харьбинского участка (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – № 11 (1). – С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC. 2021.36.47.001.
4. Бронскова Е. И. Комплексный анализ геологического строения Апрельского месторождения для эффективности доразведки и разработки залежей в тюменской свите. / Е. И. Бронскова. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 8. – С. 36-44.
5. Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дмитрак Ю. В., Шаймартдянов Т. Э. Взаимодействие природных и технических систем обеспечения сбалансированности земной поверхности при освоении недр. // Геология и Геофизика Юга России. – 2018. – Т. 8. № 4. – С. 33-43. DOI: 10.23671/VNC. 2018.4.20132.
6. Голик В. И., Кожиев Х. Х., Бурдзиева О. Г., Масленников С. А. Геомеханические факторы взаимодействия природных и технических систем в районах освоения недр. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 179-188. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481.
7. Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В. Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 2. С. 147-160. DOI: 10.46698/VNC. 2020.93.21.011.
8. Заалишвили В. Б., Реквава П. А., Мельков Д. А. Развитие сейсмостойкого строительства на горных территориях Северной Осетии на основе новой региональной кривой коэффициента динамичности. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – № 4. – С. 509-517. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-4-509-517.
9. Земцовская Е. В. Горнотехническая рекультивация отвалов скальных пород на примере АО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 7. – С. 384-391.
10. Костеневич К. А. Влияние условий формирования и постседиментационных процессов преобразования отложений на структуру пустотного пространства и фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов продуктивного горизонта тюменской свиты Краснотеневского свода. / К. А. Костеневич, О. И. Белоус, С. А. Слюнкина. // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: труды III Всероссийского научно-практического седиментологического совещания, 10–12 апреля 2017 г. – Томск: Изд-во ЦППС НД, 2017. – С. 84-90.
11. Лебедев С. В., Нестеров Е. М., Зарина Л. М. Оценочные типы цифровых карт в методологии геоэкологического картографирования. // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 5. – С. 53-57.
12. Туголуков А. В., Бармин И. С., Попович В. Ф., Лыгач В. Н. Исследование технологических свойств разновидностей апатит-штаффелитовых руд Ковдорского месторождения. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 12. – С. 37-42.
13. Туголуков А. В., Бармин И. С., Морозов В. В., Поливанская В. В. Исследование и оптимизация процесса флотационного обогащения апатит-штаффелитовой руды ковдорского месторождения. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 4. – С. 165-169.
14. Хулелидзе К. К., Кондратьев Ю. И., Бетров З. С., Заалишвили В. Б. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения тех-

нологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – № 8 (1). – С. 46-51. DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51.

15. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 4. С. 70-100. DOI: 10.46698/VNC. 2020.87.26.005.

16. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81-94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007.

17. De Oliveira D.M., Sobral L.G. S., Olson G.J., Olson S.B. Acid leaching of a copper ore by sulphur-oxidizing microorganisms. // Hydrometallurgy. – 2014. – Vol. 147-148. – pp. 223-227. DOI: 10.1016/j. hydromet. 2014.05.019

18. Elshkaki A., Reck B.K., Graedel T.E. Anthropogenic nickel supply, demand, and associated energy and water use. // Resources, Conservation and Recycling. – 2017. – Vol. 125. – pp. 300-307.

19. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Chandrasekaran S.S., Melkov, D.A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2020. – No. 12 (4). – pp. 572-581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

20. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2016. – Vol. 37. No. 2. – pp. 73-119.

21. Klyuev R. V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2020. – No. 2. – pp. 283-290.

22. Sebutsoe T.C., Musingwini C. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2017. – Vol. 117. – pp. 199-206.

23. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. // Hydrometallurgy. – 2015. – Vol. 157. – pp. 306-324. DOI: 10.1016/j. hydromet. 2015.08.022.

24. Song X., Pettersen J.B., Pedersen K.B., Roberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway. // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 16415. – pp. 892-904.

25. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A. V., Ginzburg A.A. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2019. – Vol. 9 (4). – pp. 87-101. DOI: 10.23671/VNC. 2019.4.44491.

26. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – No. 1333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

References

1. Bembel R.M., Sukhov V.A., Schetinin I.A. Ways of increasing geological efficiency of hydrocarbon fields development in Western Siberia. Oil and Gas Studies, 2017. No. 6. pp. 6-10. DOI: 10.31660/0445-0108-2017-6-6-10 (In Russ.)

2. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Azhmukhamedov I.M. Development of methods and management tools aerogas dynamics processes at mining sites. Sustainable development of mountain territories, 2021. No. 1. pp. 77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83. (In Russ.)

3. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Gavrina O.A. Analysis of geological-geophysical materials and qualitative assessment of the oil and gas perspectives of the Yuzhno-Kharbizhinsky area (North-

ern Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*, 2021. No. 11 (1). pp 6-21. DOI:10.46698/VNC. 2021.36.47.001. (In Russ.)

4. Bronskova E.I. Complex analysis of the geological structure of the Aprelskoye field for the efficiency of additional exploration and development of deposits in the Tyumen suite. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2016. No. 8. pp. 36-44. (In Russ.)

5. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dmitrak Yu.V., Sheymartdyanov T.E. Interaction of natural and technical systems for ensuring balance of earth surface when developing bowelsin. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2018. Vol. 8 (4). pp. 33-43. DOI: 10.23671/VNC. 2018.4.20132. (In Russ.)

6. Golik V.I., Kozhiev Kh.Kh., Burdzieva O.G., Maslennikov S.A. Interaction of Natural and Technical Systems in the Subsoil Development Areas. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2019. Vol. 9 (3). pp. 179-188. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481. (In Russ.)

7. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V. Ground geodynamics control by regulating stress level. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10 (2). pp. 147-160. DOI: 10.46698/VNC. 2020.93.21.011. (in Russ.)

8. Zaalishvili V.B., Rekvava P.A., Melkov D.A. Development of seismic resistance constructions in the mountain territories of North Ossetia on the basis of a new regional curve of dynamicity coefficient. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018. No. 10 (4). pp. 509-517. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-4-509-517. (In Russ.)

9. Zemtsovskaya E.V. Rock dumps mining recultivation the case of «Kovdorsky GOK» JSC. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*, 2016. No. 7. pp. 384-391. (In Russ.)

10. Kostenevich K.A. Influence of formation conditions and postsedimentary processes of sediment transformation on the structure of the void space and filtration-capacity properties of reservoir rocks of the productive horizon of the Tyumen suite of the Krasnoleninsky arch. K.A. Kostenevich, O.I. Belous, S.A. Slyunkina. *Modern problems of sedimentology in oil and gas engineering: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Sedimentological Meeting*, April 10-12, 2017. Tomsk. Publishing house of TsPPS ND, 2017. pp. 84-90. (In Russ.)

11. Lebedev S.V., Nesterov E.M., Zarina L.M. Title of the article: evaluative types of digital maps in methodology of geoecological cartography. *Regional Environmental Issues*, 2013. No. 5. pp. 53-57. (In Russ.)

12. Tugolukov A.V., Barmin I.S., Popovich V.F., Lygach V.N. Study of technological properties of varieties of apatite-staffelite ores of the Kovdor deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2011. No. 12. pp. 37-42. (In Russ.)

13. Tugolukov A.V., Barmin I.S., Morozov V.V., Polivanskaya V.V. Research and optimization of the process of flotation concentration of apatite-staffelite ore of the Kovdor deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*, 2012. No. 4. pp. 165-169. (In Russ.)

14. Hulelidze K.K., Kondratyev Y.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north ossetia-alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2016. No. 8 (1). pp. 46-51. DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51. (In Russ.)

15. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10 (4). pp. 70-100. DOI: 10.46698/VNC. 2020.87.26.005. (in Russ.)

16. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021. Vol. 11 (1). pp. 81-94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007. (in Russ.)

17. De Oliveira D.M., Sobral L.G.S., Olson G.J., & Olson S.B. Acid leaching of a copper ore by sulphur-oxidizing microorganisms. *Hydrometallurgy*, 2014. Vol. 147-148, pp. 223-227. DOI: 10.1016/j.hydromet. 2014.05.019

18. Elshkaki A., Reck B.K., Graedel T.E. Anthropogenic nickel supply, demand, and associated energy and water use. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017. Vol. 125. pp. 300-307.

19. Ganapathy G. P., Zaalishvili V. B., Chandrasekaran S. S., Melkov D. A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020. No. 12 (4). pp. 572-581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

20. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2016. Vol. 37. No. 2. pp. 73-119.

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

22. Sebutsoe T. C., Musingwini C. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2017. Vol. 117. pp. 199-206.

23. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*, 2015. Vol. 157. pp. 306-324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.

24. Song X., Pettersen J. B., Pedersen K. B., Roberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copperore mine: A case study in Northern Norway. *Journal of Cleaner Production*, 2017. Vol. 16415. pp. 892-904.

25. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., Nikolaev A. V., Ginzburg A. A. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2019. Vol. 9 (4). pp. 87-101. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44491.

26. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. No. 333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 55:504.75:550.348

DOI: 10.46698/VNC. 2021.29.52.011

Оригинальная статья

Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности

М. Г. Попов , О. Г. Попова 

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

Статья поступила: 11.04.2021, доработана: 10.05.2021, одобрена в печать: 18.05.2021

Резюме: Актуальность работы. Актуальность настоящей статьи состоит в том, чтобы показать возможность при проведении локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) получать не только двумерное, но и трехмерное представление о глубинном и скоростном строении изучаемого объекта, а также анализировать трехмерные модели показателей напряженного состояния геологической среды во времени. ЛСЭМ проводится на ограниченных территориях с целью оценки степени экологической безопасности и уменьшения риска опасных природных явлений на этапе наблюдения при строительстве и эксплуатации объектов особой важности, таких как ГЭС, АЭС, объектов недропользования, а также мегаполисов. **Цель работы.** Цель настоящей статьи показать результаты трехмерного комплексного изучения среды с помощью локального сейсмо-экологического мониторинга на реальных объектах для районов Балаковской АЭС и Московского мегаполиса. **Методы исследования.** По кинематике обменных волн PS от далеких землетрясений получены данные о рельефе глубинных границ и скоростном строении изучаемых регионов. Построены трехмерные модели глубинного и скоростного строения. По энергии обменных волн от далеких землетрясений оценены показатель анизотропности γ и показатель напряженного состояния среды S для разных уровней глубин и разных временных интервалов наблюдения в районе планируемой Тверской АЭС. **Результаты исследований.** Построены трехмерные модели показателя анизотропности γ . Полученные трехмерные модели показателя анизотропности γ и оценка показателя S позволили выявить аномалии показателя γ , усиление и исчезновение этих аномалий в пространстве и во времени, а также выявить влияние далекого катастрофического землетрясения из района Аляски на изменение значений геодинамических показателей. Сделан вывод, что при проведении локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) в разных районах исследования имеется возможность построить трехмерные модели глубинного и скоростного строения исследуемого региона, а также изучить распределение геодинамических показателей анизотропности γ и напряженного состояния S в разных диапазонах глубин и для разных временных интервалов, и как результат, построить трехмерные модели, характеризующие напряженное состояние региона во времени.

Ключевые слова: сейсмо-экологический мониторинг, геодинамические показатели напряженного состояния геологической среды, обменные волны от далеких землетрясений, повышенная экологическая опасность.

Для цитирования: Попов М. Г., Попова О. Г. Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности. *Геология и Геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): xx-xx. DOI: 10.46698/VNC. 2021.29.52.011.

DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011

Original paper

The possibility of complex studying for the geological environment during seismic-ecological monitoring in areas of increased environmental danger

M. G. Popov , O. G. Popova 

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

Received: 11.04.2021, revised: 10.05.2021, accepted: 18.05.2021

Abstract. Relevance. The relevance of this article is to show the possibility of obtaining not only a two-dimensional, but also a three-dimensional idea about the depth and speed structure of the object during researching by local seismic-ecological monitoring (LSEM), as well as to analyze three-dimensional models of indicators of the stress state of the geological environment over time. LSEM is carried out in limited areas in order to assess the degree of environmental safety and reduce the risk of natural hazards at the stage of observation during the construction and operation of facilities of special importance, such as hydroelectric power stations, nuclear power plants, subsoil use facilities, as well as megalopolis. **Aim.** The purpose of this article is to show the results of a three-dimensional complex study of the environment using local seismic-ecological monitoring at real objects for the Balakovo NPP region and the Moscow megalopolis. **Methods.** Based on the kinematics of the converted waves PS from distant earthquakes, data were obtained on the relief of deep borders and the speed structure of the studied regions. Three-dimensional models of deep and speed structure were built. Based on the energy of converted waves from distant earthquakes, the anisotropy indicator γ and the stress state indicator of medium S for different depth levels and different time observation intervals for the area of the planned Tver NPP were estimated. **Results.** Three-dimensional models of the anisotropy indicator γ are built. The obtained three-dimensional models of the anisotropy indicator γ and the assessment of the indicator S revealed the anomalies of the indicator γ , the amplification and disappearance of these anomalies in space and in time, as well as the influence of a distant catastrophic earthquake from the Alaska region on the change in the values of geodynamic indicators. It was concluded that when conducting local seismic-ecological monitoring (LSEM) in different study areas, it is possible to build three-dimensional models of the depth and speed structure of the studied region, as well as to study the distribution of geodynamic indicators of anisotropy of γ and stress state S in different depth ranges and for different time observation intervals, and as a result, to build three-dimensional models characterizing the stressed state of the region in time.

Keywords: seismic-ecological monitoring, geodynamic indicators of the stressed state of the geological environment, converted waves from distant earthquakes, increased environmental hazard.

For citation: Popov M. G., Popova O. V. The possibility of complex studying for the geological environment during seismic-ecological monitoring in areas of increased environmental danger. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): xx-xx. DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011.

Введение

Геологическая среда является неоднородной, состоящей из пустот, флюидов, слоев, блоков и т.п. с разным напряженным состоянием, поэтому ритмы и катастрофы передаются в среде по-разному. Для изучения всех этих процессов требу-

ется геофизический мониторинг, и как частный случай – сейсмический мониторинг. Сейсмический мониторинг – это «длительные непрерывные или циклические (периодические) наблюдения за изменениями сейсмических характеристик определенного участка геологической среды [Гамбурцев, 1982]». На исследуемой территории организуется сеть непрерывных долговременных (или периодических) наблюдений, проводится оперативная обработка и интерпретация сейсмических данных. Результатом этих исследований должен быть выход на прогнозные оценки. В последние годы возникло понятие экологический мониторинг. Этот мониторинг необходим для обеспечения безопасности регионов повышенной сейсмической опасности, особенно мегаполисов, чтобы предупредить возникновение чрезвычайных ситуаций, а также для безопасного выбора мест проектирования и строительства объектов особой важности (АЭС, ГЭС и др.).

Задачи экологического мониторинга для оценки во времени состояния геологической среды на ограниченных территориях с целью уточнения степени их экологической опасности могут решаться с помощью сейсмического мониторинга. Такой сейсмический мониторинг можно назвать локальным сейсмо-экологическим мониторингом (ЛСЭМ) [Попова и др., 2016]. В густонаселенных урбанизированных районах при проведении ЛСЭМ в основном используется сейсмический мониторинг, регистрирующий волны от естественных источников. В основном используются записи далеких землетрясений и записи микросейсмического фона.

В последние пятнадцать лет локальный сейсмо-экологический мониторинг (ЛСЭМ) проводился как в тектонически активных, так и в платформенных регионах [Попова и др., 2016]. Все исследованные объекты можно разделить на три категории: 1) сейсмоопасные зоны, 2) урбанизированные территории мегаполисов, 3) особо важные объекты (например, гидро- и атомные электростанции).

Методы исследования

При проведении локального сейсмо-экологического мониторинга, как правило, применялась площадная расстановка пунктов наблюдения (локальная сеть), состоящая из 3-компонентных цифровых сейсмических станций. Площадь исследования обычно порядка ($60 \times 60 \text{ км}^2$ – $40 \times 60 \text{ км}^2$). Длительность наблюдения в зависимости от задач мониторинга колебалась от 2-3 месяцев до 11 лет. [Попова и др., 2016]. Оптимальное количество станций на площади $60 \times 60 \text{ км}^2$ порядка 10-15, но не менее 5-7. Расстояние между станциями составляло 12-20 км, оптимально 16 км.

При оценке сейсмо-экологической опасности важнейшая геодинамическая характеристика геологической среды – это напряженно-деформированное состояние. Основными достоинствами ЛСЭМ является возможность оценивать степень напряженного состояния среды на этапе наблюдения, выявлять местную сейсмичность (если таковая имеется) и следить за ее режимом, а также получить представление о глубинном и скоростном строении изучаемого региона. Причем, в результате обработки зарегистрированных записей локального сейсмо-экологического мониторинга получают не только двумерное, но и трехмерное представление о параметрах глубинного и скоростного строения изучаемой среды, а также ее напряженно-деформированного состояния.

Принципы обработки далеких землетрясений для изучения глубинного строения разработаны в методе МОВЗ [Померанцева, Мозженко, 1997]. Интерпретация кинематики обменных волн PS от далеких землетрясений позволяет получить пред-

ставление о глубинном строении изучаемой среды. Представление о скоростном строении среды получают по временам вступления волн Р от далеких землетрясений, используя метод сейсмической томографии [Aki et al., 1977].

Оценка геофизических показателей, характеризующих напряженное состояние геологической среды в пространстве и во времени проводится по разработанной методике¹, использующей энергию обменных проходящих волн PS от далеких землетрясений [Попова и др., 2016]. В основе методики лежат представления об особенностях энергии поперечных волн [Гик, 1997; Brady, 74; Crampin, 1981, 1978], поскольку обменные волны также являются волнами поперечными.

Для каждого пункта наблюдения геодинамического полигона согласно разработанной методике¹ по записям обменных волн PS от далеких землетрясений оцениваются два показателя [Попова и др., 2016]:

1) Показатель анизотропности среды γ (безразмерная величина) определяется по отношению значений энергии составляющих записи обменных волн PS от далеких землетрясений E_R – энергии тангенциальной составляющей (PSr) к E_V – энергии радиальной составляющей (PSv). Таким образом, $\gamma = E_R/E_V$. Не следует путать понятия коэффициента анизотропии χ [Шнеерсон, 2006] и показателя анизотропности γ , который позволяет констатировать только наличие в среде анизотропии в большей или в меньшей степени.

2) S – интегральный показатель напряженного состояния среды (безразмерная величина) оценивается на основании характера распределения параметра γ по площади наблюдательной сети мониторинга расчетным путем¹.

Комплексный анализ всех этих результатов позволяет прогнозировать области повышенной экологической опасности районов исследования, изменение размеров этих областей и миграцию их во времени. К сожалению, длительный (11 лет) и детальный мониторинг был проведен только для региона Кавказских Минеральных Вод [Попова и др., 2016, 2017; Попов, Попова, 2020]. В других регионах работы длились от 2-х-3-х месяцев до года или по 4-5 месяцев с перерывом [Попова и др., 2016].

Результаты исследований

Как правило, перед началом исследований ЛСЭМ анализируют имеющиеся данные инженерной сейсморазведки, ГСЗ, ультразвукового сейсмического каротажа о строении среды в районе исследования. Но материалы локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) дают дополнительные представления о глубинном и скоростном строении среды в трехмерном представлении. Примеры таких трехмерных моделей приведены на рисунках 1 и 2 для района Балаковской АЭС (Саратовская область) и на рисунке 3 для Московского мегаполиса.

Для района Балаковской АЭС по данным волн PS от далеких землетрясений были построены схемы залегания поверхности фундамента (Ф) (рис. 1а) и подошвы земной коры (граница М) (рис. 1б). Отмечается четкое поднятие фундамента в восточной части региона (глубины 1,6-2,2 км) и его углубление до глубин более 3-х км к западу. Пункты наблюдения 4 и 5, находящиеся вблизи расположения АЭС, находятся в самой сложной зоне изменения глубин поверхности фундамента.

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

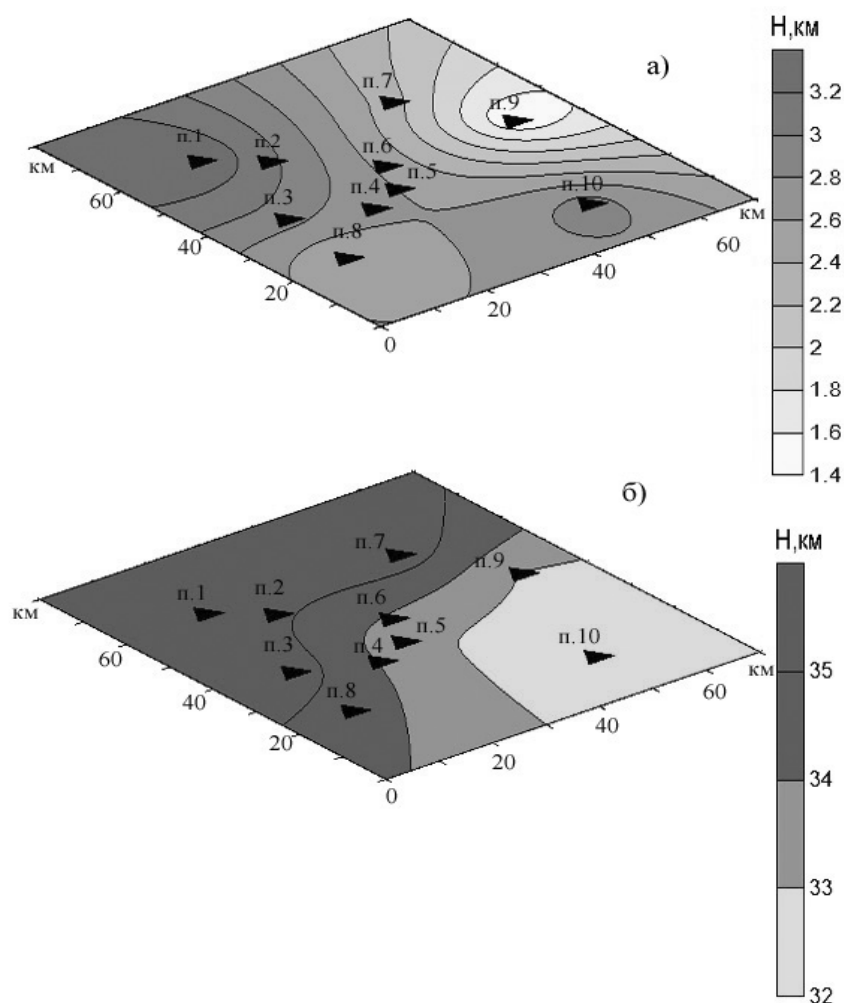


Рис. 1. Трехмерная модель глубинного строения для района Балаковской АЭС
(Саратовская область):

(а) поверхность фундамента (б) поверхность Мохоровичича (М). П. 4 – пункты наблюдения /
Fig. 1. Three-dimensional model of the deep structure for the Balakovo NPP area (Saratov region):
(a) the surface of the foundation (b) Mohorovicic discontinuity (М). P. 4 – observation points

В этой же зоне отмечена прерывистость в прослеживании более глубоких границ ниже поверхности фундамента, что позволило предположить наличие разломной зоны.

Схема залегания подошвы земной коры (границы М) приведена на рисунке (рис. 1б). Граница М в северо-западной части более глубокая (глубина 33,5-35,5), а в юго-восточной части воздымается до глубины 32,5-33 км. Структурные планы границ Ф и М не согласуются между собой, и не являются «зеркальными», а повернуты друг относительно друга.

На рисунке 2 приведена трехмерная скоростная модель строения среды, полученная по данным ЛСЭМ для района Балаковской АЭС. Как видно из рисунка, на глубинах 0-25 км выделяется неконтрастная высокоскоростная структура, протягивающаяся с запада на восток. Перепад скоростей от центральной части структуры

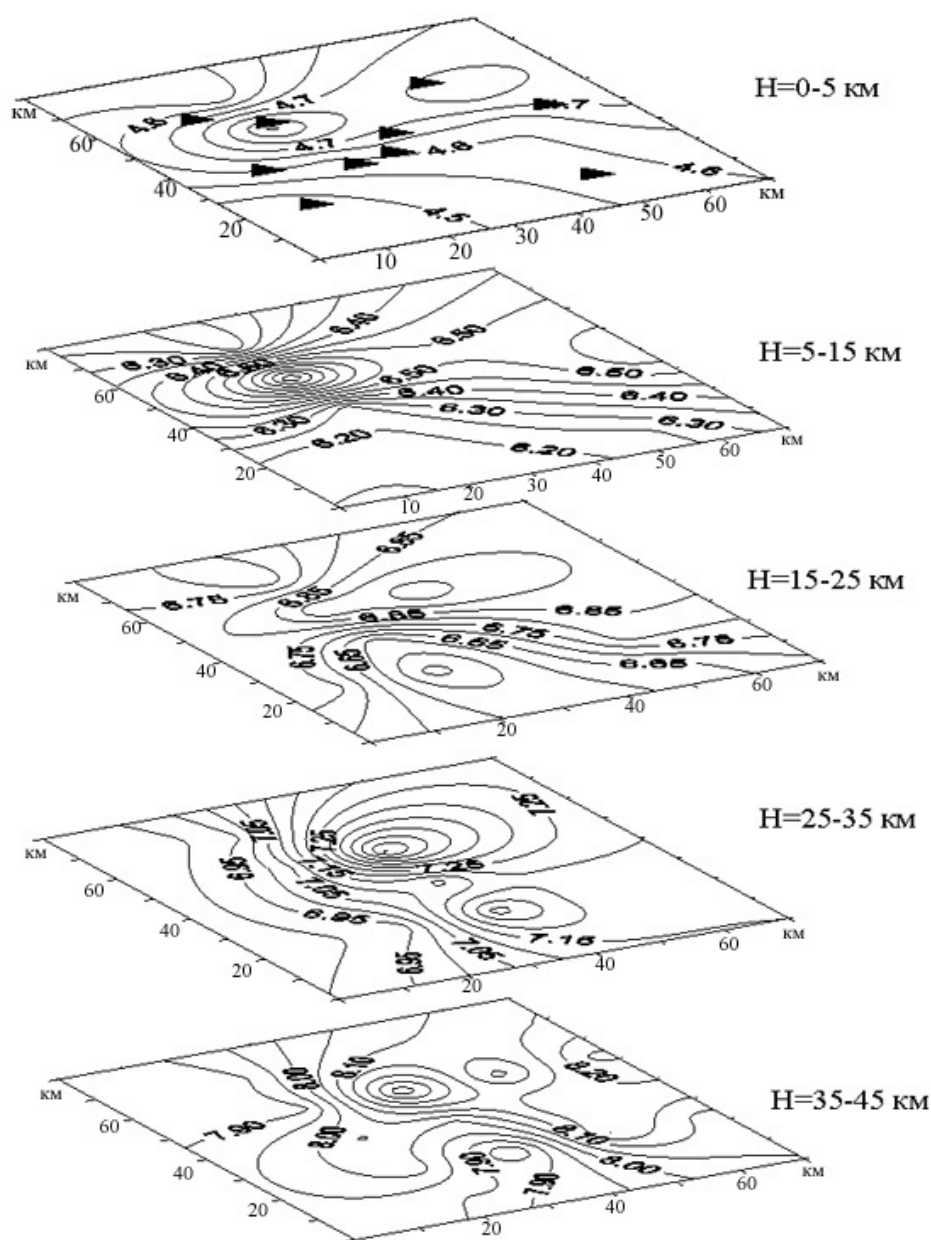


Рис. 2. Трехмерная скоростная модель Балаковского полигона (Саратовская область)

– пункты наблюдения /

Fig. 2. Three-dimensional velocity model of the Balakovo test site (Saratov region).

– observation points

к периферии составляет 0,2-0,4 км/с. Высокоскоростная часть структуры совпадает с областью наиболее контрастного изменения глубин фундамента (см. выше). В нижней части разреза ($H > 25$ км) отмечается изменение плана распределения скоростей. Высокоскоростная аномалия перемещается в северо-восточную часть района. Можно видеть, что наиболее высоко градиентная область изменения скоростей на всех уровнях глубин соответствует области расположения атомной станции (п. н. 4 и 5), что позволяет сделать вывод о необходимости постоянных наблюдений

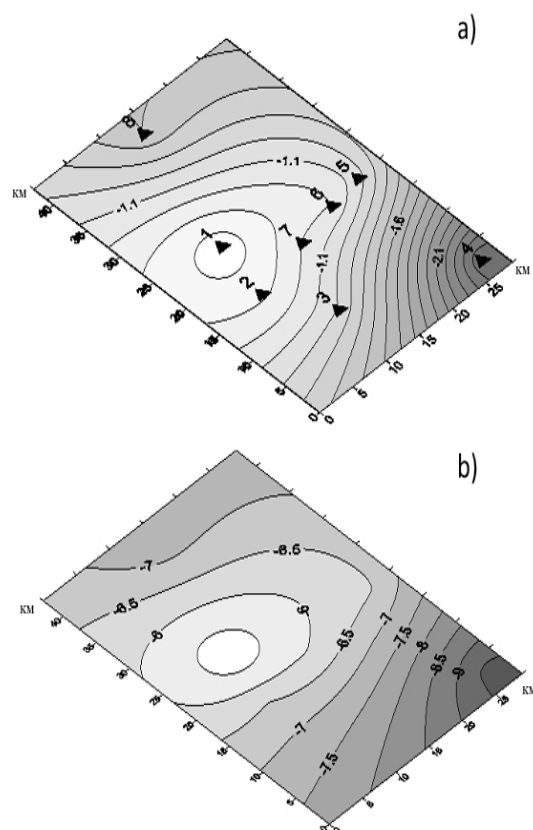


Рис. 3. Трехмерная модель глубинного строения верхней части консолидированной земной коры для Московского мегаполиса: поверхность фундамента (а), граница ниже поверхности фундамента (б). 2 – пункты наблюдения /

Fig. 3. Three-dimensional model of the deep structure of the upper part of the consolidated Earth's crust for the Moscow megalopolis: foundation surface (a), boundary below the foundation surface (b). 2 – observation points

за геодинамическими показателями в этой области района наблюдений. Наличие предполагаемой разломной зоны в районе пунктов наблюдения 4 и 5 указывает на необходимость сгущения наблюдательной сети, чтобы не пропустить изменения показателей напряженного состояния во времени в этой зоне, которое может быть связано с местной локальной сейсмичностью [Огаджанов, Маслова, 2017] и с наведенными процессами [Николаев, 1994] от близких землетрясений ($\Delta \leq 1000$ км) из Средне-Уральской сейсмоопасной зоны и из региона Северного Кавказа.

Для района Московского мегаполиса (платформенный регион) приведено трехмерное изображение поверхности фундамента и границы в верхней части Земной коры (рис. 3а, б). В центральной части мегаполиса по рельефу обеих границ выявляется куполообразная структура. К куполообразным структурам больших размеров, порядка 100-120 км в диаметре часто приурочены эпицентры сильных землетрясений [Крылов и др., 1993]. В нашем случае определяется структура малых размеров (10*15 км²). К этой структуре приурочена центральная часть мегаполиса, для которой характерно интенсивное многоэтажное строительство [Севостьянов и др., 2011] и высокий уровень микросейсм, связанных с транспортом. Под влиянием растущей нагрузки мегаполиса на геологический субстрат, являющийся основанием и вмещающей средой инженерных сооружений, транспортных магистралей и ком-

муникаций, возникает увеличение риска природно-техногенных катастроф. Может произойти снижение устойчивости массивов горных пород, следствием чего является деформация зданий [Вахрина и др., 2018; Никонов, 2016], разрушение подземных коммуникаций и в целом ухудшение общей экологической ситуации. Воздействие микросейсмического фона также сказываться по-разному в зависимости от напряженного состояния среды [Адушкин, Спивак, 2006; Соболев, 2004]. Поэтому изучение напряженного состояния во времени и оценка уровня микросейсмического фона должны быть неразрывно связаны. Все это требует проведения длительного локального сейсмо-экологического мониторинга, и сгущения сети наблюдений в области выделенной куполообразной структуры.

Трехмерные модели распределения показателя анизотропности γ получены для ряда районов экологической опасности, в которых проводился ЛСЭМ [Попов, Попова, 2020]. На рисунке 4 показаны трехмерные модели показателя γ для района планируемой Тверской АЭС, который находится в пределах Крестцовско-Валдайского рифейского авлакогена Восточно-Европейской платформы. На прогностическом полигоне для изучения геологической среды в районе проектируемой Тверской АЭС сейсмо-экологический мониторинг длился 7 месяцев 2012-2013 гг. Цель мониторинга – выявление возможных изменений геодинамических показателей γ и S в районе размещения сети наблюдений, а также зон с повышенным напряженным состоянием и их миграцию во времени и в пространстве.

Сведения об исторических землетрясениях на Русской платформе содержатся в ряде систематических макросейсмические описаниях [Аптикаев и др., 2012; Борисенков, Пасецкий, 1988; Жигалин, Николаев, 2012; Жигалин, 2014; Никонов, 1984]. С учетом анализа отечественных и зарубежных каталогов рассматриваемый район – это в сейсмическом плане слабоактивная территория, с магнитудой (M) возможных землетрясений не более 2-3,5. С 2009 года по настоящее время местных и удаленных землетрясений ($\Delta < 1000$ км) в районе работ не было зафиксировано.

Территория планируемой Тверской АЭС находится в области воздействия землетрясений из сейсмоопасной зоны Вранча. Последние сильные 3-4-х балльные воздействия от землетрясения из зоны Вранча ощущались в 1977 г. [Жигалин, Николаев, 2012; Жигалин, 2014]. В работах [Попова и др., 2016] было показано, что за счет влияния далекого катастрофического землетрясения в сейсмоопасных регионах возможно усиление степени анизотропности и напряженного состояния среды, которое в свою очередь может привести к усилению местной сейсмической активизации и возникновению деформационных процессов в среде. Это связано с воздействием интенсивных низкочастотных поверхностных волн, которые регистрируются после волны Р. Такая сейсмическая активизация считается наведенной [Николаев, 1994]. Наведенная сейсмичность имела место и в районе Кольской АЭС, которая считается геодинамически активной областью повышенной сейсмичности, хотя и расположенной на Балтийском щите Восточно-Европейской платформы.

На основании скоростных разрезов профилей ГСЗ – МОВЗ [Егоркин, 1991], земная кора района расположения Тверской АЭС разделена на четыре глубинных диапазона (слоя). Слой 0-2,5 км со скоростью прохождения продольной волны 2,5 км/с отвечает осадочному чехлу, слой 2,5-10 км со скоростью волны 5,5 км/с – верхней части консолидированной коры, слой 10-22 км со скоростью волны 6,33 км/с – средней части коры и слой 22-32,5 км со скоростью 6,64 км/с отнесен к нижней части коры.

Оценка геодинамических показателей S и γ была проведена для пяти интервалов наблюдения и четырех диапазонов глубин земной коры 1) 0-2,5 км, 2) 2,5-10 км, 3) 10-22 км, 4) 22-32,5 км (рис. 4). Интервалы наблюдения выбирались с учетом возможности оценки влияния такого внешнего фактора как катастрофическое далекое землетрясение [Попова и др., 2016] и с учетом достаточности для обработки кондиционного фактического материала. На основании результатов обработки по методике¹ были построены 3-х мерные пространственно – временные модели показателя γ и проведена оценка показателя S (рис. 4). Полученные трехмерные модели позволили выявить аномалии показателя γ , усиление и исчезновение этих аномалий в пространстве, а также определить влияние далеких катастрофических землетрясений на изменение значений геодинамических показателей. В период наблюдения было зарегистрировано всего одно далекое землетрясение с магнитудой $M = 7.5$, произошедшее на Аляске 5.01.2013 г.

В первых двух временных интервалах наблюдения (1.11.12-5.01.13) и (5.01.13-31.01.13) показатель анизотропности γ в слое 0-2,5 км не превышал 0,33, а $S = 0$ (рис. 4). Если сравнить эти показатели с геодинамическими показателями на других полигонах [Попова и др., 2016; Попов, Попова, 2020], то это изменение можно рассматривать как не существенное, не приводящее к каким-либо последствиям.

Зарегистрированное на Тверском полигоне на рубеже 1-го и 2-го временных интервалов катастрофическое землетрясение, произошедшее на Аляске 5.01.2013 г.

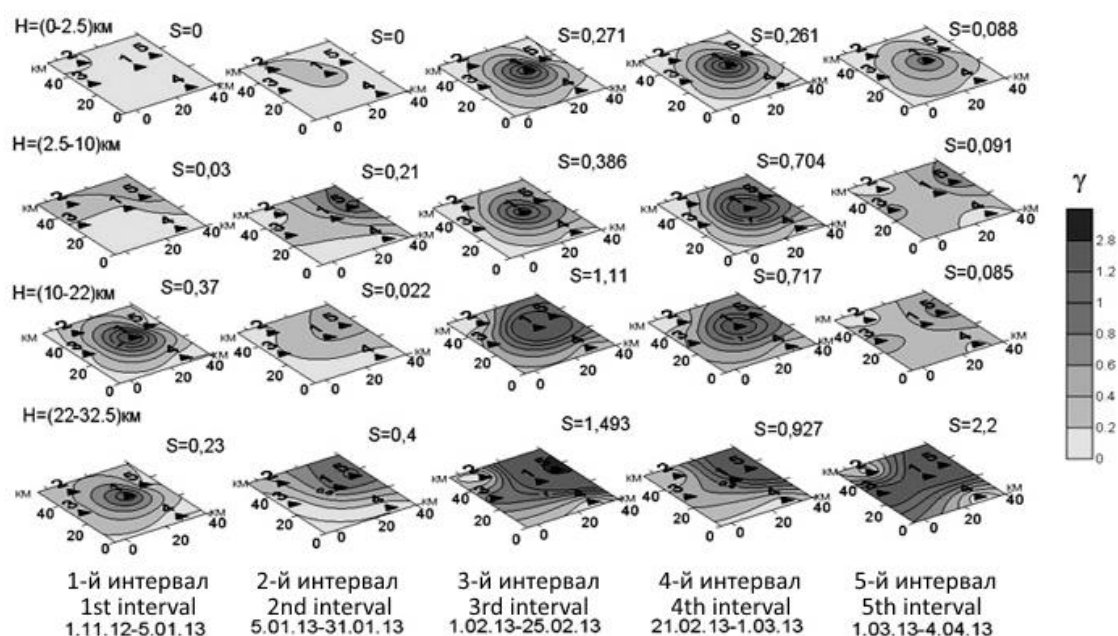


Рис. 4. Трехмерные модели распределения геодинамического показателя анизотропности γ в разные интервалы наблюдений 2012-2013 гг. на Тверском полигоне.

S – оценка значений показателя напряженности.

– пункты наблюдения /

Fig. 4. Three-dimensional models of the geodynamic anisotropy index γ distribution within different intervals of observations in 2012-2013 at the Tver test site.

S – assessment of the values of tension index.

– observation points

с магнитудой $M=7,5$, сопровождалось цугом низкочастотных поверхностных волн. Но это не привело к значительному изменению геодинамических показателей ни в одном диапазоне глубин 2-го временного интервала (рис. 4)

В последующие интервалы наблюдения (3-й, 4-й и 5-й) на глубинах 10–32,5 км отмечается некоторое увеличение показателей анизотропности γ и напряженного состояния S соответственно от 1,5 до 3,3 и от 0,085 до 2,2. Значение 2,2, отмечаемое в 5-м интервале наблюдения, сравнимо со значениями в сейсмоопасных регионах [Попова и др., 2016; Попов, Попова, 2020]. Однако, маловероятно, что эти повышенные значения связаны с наведенными процессами от землетрясения из региона Аляски, поскольку прошло уже два месяца, а наведенные процессы проявляются практически сразу после влияния поверхностных волн, как это отмечалось в сейсмоопасных районах [Попова и др., 2016]. В данном случае увеличение геодинамических показателей на больших глубинах, можно объяснить особенностью глубинного строения земной коры, выраженной древней и очень протяженной вещественно-структурной неоднородностью – Крестцовско-Валдайским рифейским авлакогеном северо-восточного простирания и его современной активизацией.

Таким образом, произошедшее на Аляске далекое катастрофическое землетрясение, не вызвало изменений в значениях геодинамических показателей (γ и S) в пределах Тверского полигона. Результаты сейсмического мониторинга по Тверскому полигону очень близки к результатам оценки геодинамических показателей (γ и S) Московского полигона [Попова и др., 2016]. Геологическое строение этих двух районов также очень сходно. За время наблюдений на территории Московского мегаполиса возникали контрастные области с высокими значениями коэффициента анизотропности до 2,0–2,8, при этом показатель S соответственно возрастал до значений 1,5–2,08.

Поскольку территория изучаемого полигона Тверской АЭС находится в 3–4-х балльной области воздействия землетрясений из сейсмоопасной зоны Вранча возможно сложение естественного неотектонического и наведенного полей напряжений, что может привести к увеличению напряжений, а это, в свою очередь, к возникновению разного рода подвижек и деформаций, а также к активизации местных сейсмических событий. В этой связи для района Тверской АЭС рекомендуется проведение постоянного или периодического сейсмо-экологического мониторинга с детальной сетью расположения станций сейсмических наблюдений.

Выводы

Таким образом, при проведении локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) в разных районах исследования имеется возможность:

1. Построить трехмерную модель рельефа глубинных границ в разных глубинных диапазонах, выявить сложные структуры рельефа этих границ, согласность и несогласность их залегания, наличие возможных глубинных разломов.
2. Получить трехмерную скоростную модель для разных глубинных диапазонов, выявить наличие высокоскоростных и низкоскоростных структур, их размеры, область распространения по латерали и вертикали. Выявить резко градиентные зоны перехода от высокоскоростных структур к низкоскоростным.
3. Уточнить на основании особенностей глубинного и скоростного строения региона конфигурацию сети наблюдения для дальнейшего изучения геодинамических показателей.

4. Изучить распределение геодинамических показателей напряженного состояния γ и S в разных интервалах глубин и для разных временных интервалов, и как результат, построить трехмерные модели, характеризующие напряженное состояние региона во времени. Выявить области «повышенной напряженности», их контрастность, размеры, распределение по разрезу и во времени, что дает возможность прогнозировать экологическую безопасность региона [Dobrovolsky et al., 1979].

Литература

1. Адушкин В. В., Спивак А. А. Микросейсмичность и интенсивность релаксационных процессов в земной коре. // ДАН. – 2006. – Т. 408. № 4. – С. 532-534.
2. Аптикаев С. Ф., Мирмович Э. Г., Рузайкин А. И. Сейсмическая активность Восточно-Европейской платформы как возможный источник чрезвычайных ситуаций в мегаполисах. // Безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 9. – С. 27-36.
3. Борисенков Е. П., Пасецкий В. М. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. – М.: Мысль, 1988. – 524 с.
4. Вахрина Г. Н., Чупанов М. Р., Гизяттулин И. Р. Анализ динамической реакции здания при реальном сейсмическом воздействии. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2018. – № 2. – С. 39-45.
5. Гамбурцев А. Г. Сейсмический мониторинг литосферы. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
6. Гик Л. Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. № 4. – С. 804-815.
7. Егоркин А. В. Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам. / В кн.: Глубинное строение территории СССР. / Ред. В. В. Белоусов, Н. И. Павленкова, Г. И. Кветковская. – М.: Наука, 1991. – С. 118-135.
8. Жигалин А. Д., Николаев А. В. Особенности сейсмичности Восточно-Европейской платформы. // Геоэкология. – 2012. – № 5. – С. 449-454.
9. Жигалин А. Д. Особенности сейсмичности московского региона. // Вестник РАЕН. – 2014. – Т. 14. № 2. – С. 109-111.
10. Крылов С. В., Мишенькин Б. П., Мишенькина З. Р. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р и S волнах. – Новосибирск: Наука, 1993. – 199 с.
11. Николаев А. В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность. – М.: Наука, 1994. – 222 с.
12. Никонов А. А. Землетрясения (Прошлое, современность, прогноз). – М.: Знание, 1984. – 192 с.
13. Никонов А. А. К оценке сейсмических воздействий от удаленных глубокофокусных землетрясений на высоких этажах зданий Москвы. // Геоэкология. – 2016. – № 3. – С. 195-215.
14. Огаджанов А. В., Маслова М. Ю. Локальная сейсмичность Саратовского геодинамического полигона. // Недра Поволжья и Прикаспия. Региональный научно-технический журнал. – 2017. – Вып. 89. – С. 60-65.
15. Померанцева И. В., Мозженко А. Н. Сейсмические исследования с аппаратурой Земля. – М.: Недра, 1997. – 256 с.
16. Попова О. Г., Попов М. Г., Аракелян Ф. О., Неядько В. В., Васютинская С. Д. Основные результаты по локальному сейсмоэкологическому мониторингу в разных регионах Российской Федерации. // Геоэкология. – 2016. – № 6. – С. 483-496.
17. Попова О. Г., Макеев В. М., Попов М. Г., Аракелян Ф. О., Неядько В. В. Геодинамическое состояние среды территорий планируемых и действующих атомных электростанций, расположенных в разных тектонически активных областях. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 4. – С. 99-108. DOI: 10.23671/VNC. 2017.4.9529
18. Попов М. Г., Попова О. Г. Изучение во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 3. – С. 79-93.

19. Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А., Шпекторова О.А. Сейсмическое микрорайонирование территории г. Москвы для высотного строительства. // Геоэкология. – 2011. – №4. – С. 319-327.
20. Соболев Г.А. Вариации микросейсм перед сильным землетрясением. // Физика Земли. – 2004. – №6. – С. 3-13.
21. Шнеерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. – М.: ГЕРС, 2006. – 160 с.
22. Aki K., Christoffersson A., Husebye E. S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol. 82. No. 2. – pp. 277-296.
23. Brady B. T. Theory of Earthquake. // Pageophys. – 1974. – Vol. 112. No. 4. – 701 p.
24. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. // Wave motion IVO. 3. – 1981. – pp. 343-391.
25. Crampin S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. // Geophys J. R. astr. Soc. – 1978. – No. 53. – pp. 426-467.
26. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Mishkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zone. // Pure Appl. Geophys. – 1979. – Vol. 117. No. 5. – pp. 1025-1044.

References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. Microseismicity and intensity of relaxation processes in the earth's crust. DAN. 2006. No. 4. Vol. 408. pp. 532-534. (In Russ.)
2. Aptikaev S.F., Mirmovich E.G., Ruzaikin A.I. Seismic Activity of the East European Platform as a Possible Source of Emergencies in Metropolitan Areas. Life safety. 2012. No. 9. pp. 27-36. (In Russ.)
3. Borisenkov E.P. Pasetskiy V.M. A thousand-year chronicle of extraordinary natural phenomena. Moscow. Mysl, 1988. 524 p. (In Russ.)
4. Vakhrina G.N., Chupanov M.R., Gizyattulin I.R. Analysis of the dynamic reaction of the building under real seismic impact. Earthquake-resistant construction. Safety of structures. 2018. No. 2. pp. 39-45. (In Russ.)
5. Gamburtsev A.G. Seismic monitoring of the lithosphere. Moscow. Nauka, 1982. 200 p. (In Russ.)
6. Geek L.D. Physical modeling of seismic wave propagation in porous and fractured media. Geology and Geophysics. 1997. No. 4. Vol. 38. pp. 804-815. (In Russ.)
7. Egorkin A.V. The structure of the Earth's crust according to seismic geotraverses. In: The deep structure of the territory of the USSR. Moscow. Nauka, 1991. pp. 118-135. (In Russ.)
8. Zhigalin A.D., Nikolaev A.V. Features of the seismicity of the East European platform. Geoecology. 2012. No. 5. pp. 449-454. (In Russ.)
9. Zhigalin A.D. Features of seismicity of the Moscow region. Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences. 2014. No. 2. Vol. 14. pp. 109-111. (In Russ.)
10. Krylov S.V., Mishenkin B.P., Mishenkina Z.R. Detailed seismic studies of the lithosphere at P and S waves. Novosibirsk, Nauka, 1993. 199 p. (In Russ.)
11. Nikolaev A.V. Induced seismicity problems. Induced seismicity. Moscow. Nauka, 1994. 222 p. (In Russ.)
12. Nikonov A.A. Earthquakes (Past, Present, Prognosis). Moscow. Znanie, 1984. 192 p. (In Russ.)
13. Nikonov A.A. To assess seismic impacts from remote deep-focus earthquakes on high floors of buildings in Moscow. Geoecology, 2016. No. 3. pp. 195-215. (In Russ.)
14. Ogadzhyanov A.V., Maslova M.Yu. Local seismicity of the Saratov geodynamic polygon. Subsoil of the Volga region and the Caspian Sea. Regional Scientific and Technical Journal, 2017. Out 89. pp. 60-65. (In Russ.)
15. Pomerantseva I.V., Mozhenko A.N. Seismic research with Zemlya equipment. Moscow. Nedra, 1997. 256 p. (In Russ.)

16. Popova O. G., Popov M. G., Arakelyan F. O., Nedyadko V. V., Vasyutinskaya S. D. The main results of local seismoecological monitoring in different regions of the Russian Federation. *Geoecology*. 2016. No. 6. pp. 483-496. (In Russ.)
17. Popova O. G., Makeev V. M., Popov M. G., Arakelyan F. O., Nedyadko V. V. A geodynamic condition of the environment of territories of the planned and operating nuclear power plants, active areas located in different tectonic. *Geology and geophysics of the South of Russia*, 2017. No. 4. pp. 99-108. DOI: 10.23671/VNC. 2017.4.9529 (In Russ.)
18. Popov M. G., Popova O. G. Study in time and space of the stress state of the geological environment. *Geology and Geophysics Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 79-93. (In Russ.)
19. Sevostyanov V. V., Mindel I. G., Trifonov B. A., Ragozin N. A., Shpektorova O. A. Seismic microzoning of the territory of Moscow for high-rise construction. *Geoecology*. 2011. No. 4. pp. 319-327. (In Russ.)
20. Sobolev G. A. Variations of microseism before a strong earthquake. *Earth Physics*. 2004. No. 6. pp. 3-13. (In Russ.)
21. Schneerson M. B. *Introduction to Seismic Anisotropy: Theory and Practice*. Moscow. GERS, 2006. 160 p. (In Russ.)
22. Aki K., Christoffersson A., Husebye E. S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. No. 2. pp. 277-296.
23. Brady B. T. *Theory of Earthquake*. *Pageophys.* 1974. Vol. 112. No. 4. 701 p.
24. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. *Wave motion* IVO. 3. 1981. pp. 343-391.
25. Crampin S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys J.R. astr. Soc.* 1978. No. 53. pp. 426-467.
26. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Mishkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zone. *Pure Appl. Geophys.* 1979. Vol. 117. No. 5. pp. 1025-1044.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

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

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

Инструкция для авторов

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

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

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

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

Правила оформления статьи

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

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

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$ и т.п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений (MBT/cm^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 полутонных. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

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

Адрес редакции:

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

INFORMATION FOR AUTHORS

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

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

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal “Geology and Geophysics of Russian South” publishes:

- articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;
- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor’s order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal “Geology and Geophysics of Russian South”.

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and ν , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in

formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 2. 2021 г. Том 11)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 01.07.2021 г. Формат 60×84 1/8.

Дата фактического выхода 8.07.2021 г.

Усл. печ. лист 19,7. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 58.

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