

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 3 / 2022





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 12
№ 3 / 2022**

Владикавказ 2022

**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 **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

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

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

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

д.г.н., **А. Н. Гуня**, Институт географии РАН, г. Москва

Ph. D., проф. **Ко-Лян Вэнь**, Национальный центральный университет, Тайвань
д.г.м.н. **В. М. Макеев**, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, г. Москва

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. **Али Пинар**, Босфорский университет, Турция

д.г.м.н., проф. **В. В. Стогний**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

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

д.г.-м.н., проф. **С. Г. Парада**

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 включен в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus

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 ВЦ РАН, 2022

Фото на обложке – Осенний серпантин (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,
Russian Federation

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

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

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, Russian
Federation

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

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

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

Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA

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

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

Aleksey N. Gunya, Dr. Sci. (Geogr.), Institute of
Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow
Kuo-Liang Wen, Ph. D., Prof., National Central University,
Taiwan

Vladimir M. Makeev, Dr. Sci. (Geol.Min.), Sergeev Insti-
tute of Environmental Geoscience (IEG), RAS, Moscow
Illarion D. Muzaev Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation

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,
Russian Federation

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

Valeriy V. Stogny, Dr. Sci. (Geol.Min.), Prof., Geophysi-
cal Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Center,
RAS, Vladikavkaz

Marina V. Rynnikova 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, Russian Federation
(Scopus Author ID - 6508237062)

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

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,
Russian Federation

Executive Secretary

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

Managing Editor

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

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 included in the International Reference Database and Scopus citation System

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, 2022

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

СОДЕРЖАНИЕ

===== ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ =====	
Кондаков В. М., Мамаев С. А., Мусаев М. А., Мамаев А. С. Инженерно-геологические и геоморфологические условия г. Каспийска в связи с подтоплением	6
Попов Ю. В., Пустовит О. Е., Кубрин С. П., Никулин А. Ю. Нижнетебердинский серпентинитовый массив: состав и эволюция (Большой Кавказ)	18
===== ГЕОФИЗИКА =====	
Курбанов Х. Х., Лин Хонг, Сорокина Г. В., Уздин А. М. Характеристики сейсмического движения дневной поверхности. Их использование в сейсмостойком строительстве	34
Чернов Ю. К. Некоторые данные о спектрах колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей	61
===== ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ =====	
Данилова Е. А., Дрягин В. В. Применение сейсмических и сейсмоакустических методов для выявления путей миграции углеводородов и повышения нефтеотдачи пластов в зонах тектонических нарушений Восточнортовой нефтегазоносной области Прикаспийской впадины	79
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ =====	
Богуш И. А., Рябов Г. В., Сендецкий И. И., Черкашин В. И. Перспективы рудоносности листовенитов Северного Кавказа (Приэльбрусье)	94
Мохов А. В. Реконструкция рельефа и обстановки седиментации в бассейне угленакопления (на примере Восточного Донбасса)	107
Парада С. Г., Гамбург К. Ю. Проблемы аналитического определения благородных металлов в черносланцевых породах Юга России	119
===== ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ =====	
Харченко В. М., Черненко К. И., Еремина Н. В., Самусев Д. Д. Некоторые закономерности формирования и распространения рифогенных построек в триасовых отложениях на территории Восточного Предкавказья в связи с нефтегазоносностью	133
===== ГЕОЭКОЛОГИЯ =====	
Алборов И. Д., Бурдзиева О. Г. Состояние природного равновесия в Алагиро-Садонской агломерации	146
Губанов Р. С. Оценка состояния водоохраных зон Центрального Предкавказья, на примере водных объектов Красногвардейского муниципального округа Ставропольского края при помощи методов дистанционного зондирования Земли	157
Гуня А. Н., Гайрабеков У. Т., Гагаева З. Ш. Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем	170
===== ГЕОИНФОРМАТИКА =====	
Керимов И. А., Эзирбаев Т. Б. Использование мультиспектральной съемки при наблюдении за состоянием лесного покрова Земли	182
Липилин Д. А., Евтушенко Д. Д. Оценка качества городской среды с применением геоинформационных систем на примере микрорайонов города Краснодара	195

CONTENTS

===== GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =====	
Kondakov V. M., Mamaev S. A., Musaev M. A., Mamaev A. S.	
Engineering-geological and geomorphological conditions of Kaspiysk in connection with flooding.....	6
Popov Yu. V., Pustovit O. E., Kubin S. P., Nikulin A. Yu.	
Nizhneteberdinskiy serpentinite massif: composition and evolution (Greater Caucasus).....	18
===== GEOPHYSICS =====	
Kurbanov Kh. Kh., Lin Hong, Sorokina G. V., Uzdin A. M.	
Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface.....	34
Chernov Yu. K.	
Some preliminary data on the vibration spectra of «soft» and «hard» soils during earthquakes of different magnitudes and distances.....	61
===== GEOPHYSICAL METHODS =====	
Danilova E. A., Dryagin V. V.	
Application of seismic and seismoacoustic methods to identify migration routes of hydrocarbon and enhanced oil recovery in zones of tectonic faults in the Vostochnobortovaya oil and gas region of the Peri-Caspian Depression.....	79
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY =====	
Bogush I. A., Ryabov G. V., Sendetskiy I. I., Cherkashin V. I.	
Prospects for the ore content of listvenites in the North Caucasus (the Elbrus region).....	94
Mokhov A. V.	
Reconstruction of land relief and sedimentation conditions in the coal accumulation basin (at the example of Eastern Donbass).....	107
Parada S. G., Hamburg K. Yu.	
Problems of Analytical Determination of Precious metals in Black shale rocks of Southern Russia.....	119
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS =====	
Kharchenko V. M., Chernenko K. I., Yeriomina N. V., Samusev D. D.	
Some patterns of formation and distribution of reef buildups in Triassic deposits on the territory of the Eastern Fore-Caucasus in connection with oil-and-gas potential.....	133
===== GEOECOLOGY =====	
Alborov I. D., Burdzieva O. G.	
State of natural equilibrium in Alagi-ro-Sadonsky agglomeration.....	146
Gubanov R. S.	
Assessment of the state of water protection zones of the Central Caucasus, on the example of water bodies of the Krasnogvardeysky Municipal District of the Stavropol Territory using remote sensing methods of the Earth.....	157
Gunya A. N., Gairabekov U. T., Gagaeva Z. Sh.	
Study of landscape structure to estimate carbon balance of mountain ecosystems.....	170
===== GEOINFORMATICS =====	
Kerimov I. A., Ezirbaev T. B.	
Experiences in the application of multispectral imagery in land cover observation.....	182
Lipilin D. A., Evtushenko D. D.	
Assessment of the urban environment quality using geoinformation systems by the example of microdistricts of the city of Krasnodar.....	195

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550; 550.34; 556.

DOI: [10.46698/VNC.2022.70.30.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.70.30.001)

Оригинальная статья

Инженерно-геологические и геоморфологические условия г. Каспийска в связи с подтоплением

В. М. Кондаков^{ID}, **С. А. Мамаев**^{ID}, **М. А. Мусаев**^{ID}, **А. С. Мамаев**^{ID}

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

Статья поступила: 15.07.2022, доработана: 19.08.2022, одобрена в печать: 26.08.2022

Резюме: Актуальность работы. Определение геоморфологических и гидрогеологических условий площади г. Каспийска, включая Карабудахкентский район, в связи с застройкой города и процессами подтопления территории имеет важное значение. В настоящее время город Каспийск также как и г. Махачкала интенсивно расширяется во все стороны. Район изучения относится к Приморской равнине с отрицательными и положительными отметками рельефа. В связи с высоким уровнем грунтовых вод (УГВ), более критической величины, отмечается их высокая агрессивность, а также и грунтов, залегающих выше УГВ, изменяются и сейсмоакустические свойства грунтов. **Цель работы.** Определить зоны дренированных (З-Д), слабодренированных (З-СД) и весьма слабодренированных (З-ВСД) территорий, определить застойные площади и гидрогеологические районы в зависимости от соотношения фильтрационных свойств верхней и нижней (если имеется) толщи грунтов. **Методы исследований.** Сбор накопленного материала по инженерным изысканиям. Составление таблиц химизма грунтовых вод. Определение и интерпретация фильтрационных свойств верхних водовмещающих толщ грунтов, включительно до регионального водоупора. Определение уклона дневной поверхности на характерных створах с общим понижением к морю. **Результаты работы.** Приведен химический состав грунтовых вод по 15-ти объектам. Показаны гидрогеологические условия площади города по данным инженерно-геологических изысканий, по 35-ти объектам, в том числе глубина залегания грунтовых вод, тип грунтов по сейсмичности, глубина залегания регионального водоупора, типы трех гидрогеологических районов, уклонов рельефа местности. Определены зоны дренированности территории и границы между ними. Так, показана площадь погребенной лагуны с минерализацией грунтовых вод от 21 г/литр (у озера Ак-Гель) до 89 г/литр (МКР-9). Для гидрогеологического района ГР-1 рекомендуется горизонтальный тип дренажа, для ГР-2 – вертикальный или комбинированный типы дренажа, для ГР-3 – подземный дренаж не эффективен. Указано о необходимости сейсмического микрорайонирования города Каспийска с перспективой дальнейшей застройки. Указано о необходимости сейсмического микрорайонирования не только исследованного района, но и всего города Махачкалы, с перспективой дальнейшей застройки.

Ключевые слова: грунтовые воды, подтопление, дренирование, погребенная лагуна, гидрогеологические районы, сейсмичность.

Для цитирования: Кондаков В. М., Мамаев С. А., Мусаев М. А., Мамаев А. С. Инженерно-геологические и геоморфологические условия г. Каспийска в связи с подтоплением. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 6-17. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.30.001

[DOI: 10.46698/VNC.2022.70.30.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.70.30.001)

Original paper

Engineering-geological and geomorphological conditions of Kaspiysk in connection with flooding

V. M. Kondakov , S. A. Mamaev , M. A. Musaev , A. S. Mamaev 

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

Received: 15.07.2022, revised: 19.08.2022, accepted: 26.08.2022

Abstract: Relevance. Determining the geomorphological and hydrogeological conditions of the area of the city of Kaspiysk, including the Karabudakhkent district, in connection with the development of the city and the processes of flooding of the territory is of great importance. At present, the city of Kaspiysk, as well as the city of Makhachkala, is intensively expanding in all directions. The study area belongs to the Primorskaya Plain with negative and positive relief marks. Due to the high level of groundwater (GWL), more than a critical value, their high aggressiveness is noted, as well as soils lying above the GWL, the seismoacoustic properties of soils also change. **Aim.** Determine the zones of drained (Z-D), poorly drained (Z-SD) and very poorly drained (Z-VSD) territories, determine stagnant areas and hydrogeological regions depending on the ratio of the filtration properties of the upper and lower (if any) soil strata. **Methods.** Collection of accumulated material on engineering surveys. Compilation of tables of groundwater chemistry. Determination and interpretation of the filtration properties of the upper water-bearing soil strata, including up to the regional aquiclude. Determination of the slope of the day surface on characteristic sections with a general depression towards the sea. **Results.** Given the chemical composition of groundwater for 15 objects. The hydrogeological conditions of the city area are shown according to engineering and geological surveys, for 35 objects, including the depth of groundwater, the type of soil in terms of seismicity, the depth of the regional aquiclude, the types of three hydrogeological regions, and the slopes of the terrain. The drainage zones of the territory and the boundaries between them are determined. Thus, the area of the buried lagoon with groundwater mineralization from 21 g/liter (near Lake Ak-Gel) to 89 g/liter (MKR-9) is shown. For the hydrogeological region GR-1, a horizontal type of drainage is recommended, for GR-2 – vertical or combined types of drainage, for GR-3 – underground drainage is not effective. The need for seismic microzoning of the city of Kaspiysk with the prospect of further development was indicated. The need for seismic microzoning of not only the studied area, but the entire city of Makhachkala, with the prospect of further development, was indicated.

Keywords: groundwater, flooding, drainage, buried lagoon, hydrogeological areas, seismicity.

For citation: Kondakov V. M., Mamaev S. A., Musaev M. A., Mamaev A. S. Engineering-geological and geomorphological conditions of Kaspiysk in connection with flooding. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 6-17. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.30.001

Введение

В связи с подтоплением г. Махачкалы ранее была рассмотрена центральная и юго-восточная часть города [Кондаков, Кондакова, 2019; Ревелис, Кучеренко, 1969]. В настоящей статье продолжается аналогичный анализ площади г. Каспийска (рис. 1). Основной гидрографической единицей прибрежных городов является Каспийское море. Уровень моря испытывает значительные колебания, наблюдаемые даже за последние сто лет. С 1929 года по 2022 год упал более 3 м, достигнув самого низкого положения (–29 м), за период в 700 лет. В северной части Каспийского моря по

оперативным данным морских станций и постов (Пешной, Жанбай, Кулалы остров, Тюлений остров (Росгидромет), среднее значение уровня моря соответствовало отметке минус 28,47 м на 22 января 2022 года.

Условиями развития подтопления (СП 11-105-97 часть 1, 2, 3; Отчет о СМР г. Каспийска, 1990) являются: подпор грунтовых вод (ГВ) на побережьях рек, озер, водохранилищ, моря, орошение сельскохозяйственных культур.

Природные условия. В тектоническом отношении район работ относится к южному крылу Восточно-Предкавказского краевого прогиба, осложненной Нарат-Тюбинской зоной разрывов [Брод, 1938; Островский и др., 1994; Хаин, Ломизе, 1995; Мамаев и др., 2020].

Территория г. Каспийска в геоморфологическом отношении представляет равнину, осложненную в юго-восточной части грядобразной возвышенностью (гора Турали, +30 м) представляющий останец древних сарматских отложений. Гора вытянута на 1,5 км (согласно простиранию коренных пород) при ширине 0,5 км. Равнина занимает более 90% территории города и представлена морскими террасами верхнехвалынского и новокаспийского возраста. Низменная часть города представлена тремя террасами: сартасская (–16 м), низкой – дагестанской (от –20 м до –22 м)



Рис. 1. Зоны дренированности г. Каспийска.

Условные обозначения:



– 3-D – $> 0,01$ – зона дренированная; 3-CD – 0,01-0,005 – зона слабодренированная;

3-BCD – $< 0,005$ – зона весьма слабодренированная /

Fig. 1. Drainage zones of Kaspisk.

Legend:



– Z-D – $> 0,01$ – drainage zone; Z-SD – 0,01-0,005 – poorly drained zone;

Z-VSD – $< 0,005$ – the zone is very poorly drained

и новокаспийской (от –22 м до –24 м). В юго-западной части сартасской террасы отмечаются обширные площади заболачивания. Общая мощность аккумулятивных отложений на новокаспийской террасе достигает 16 м, на дагестанской и сартасской от 3 до 13 м.

Новокаспийская терраса (от –22 м до –24 м) протягивается вдоль моря узкой полосой, от 100 м до нескольких километров. Грунтовые воды на новокаспийской террасе формируются за счет инфильтрации атмосферных осадков, воды пресные и солоноватые.

Гидрография. С юго-западной стороны территории протягивается канал им. Октябрьской Революции (КОР), который наполняет Уйташское водохранилище. Дно и стенки последнего покрыты водоизоляционным материалом. Некоторая доля фильтрации воды из канала происходит с его дна, что видно по заболоченности прилегающей к каналу территории. Длина водохранилища составляет 1,1 км, ширина 270 м, а расстояние от трассы Р-2172,1 км. Ниже водохранилища расположен пруд Рыбье, как накопитель воды (для садоводческих обществ). Напротив г. Каспийска также с юго-западной стороны имеются приблизительно 2-3 водотока питающие местные пруды, в т. ч. Приуйташский (со стороны г. Дербента, Р-217). Здесь имеет место и коллекторная сеть в виде одного водотока, дренирующего грунтовые воды. Коллектор проходит от северо-восточной окраины кирпичного завода, затем по современной улице 41 линия до ул. Ленина, далее параллельно старой трассе до Хушетского шоссе и к морю. Природные и техногенные факторы создали условия для подтопления г. Каспийска.

В тектоническом отношении г. Каспийск приурочен к структуре Восточного Предкавказского краевого прогиба в пределах довольной крупной брахиантиклинальной складки, в ядре которой выходят глины нижней части верхнего сармата. Эта складка вытянута в направлении Северо-запад 315° и Юго-восток – 135° . Падение складки на Северо-восток 45° составляет 8° – 12° .

В геологическом строении района принимают участие новокаспийские и хвалынские образования до глубины 4,0-16,0 м. Ниже залегают коренные неогеновые отложения сарматского яруса, представленные известняками и твердыми слоистыми песчаными глинами. Последние залегают до глубины 500 м.

Речка Черкез-Озень берет свое начало за южной границей города в Талгинском ущелье. Общая длина реки более 24 км, водосборная площадь около 153 км². В период таяния снегов и выпадения ливневых дождей водные потоки, стекающие по многочисленным балкам и оврагам, резко повышают уровень воды в речке. В остальное время года, особенно в июле-августе, это небольшой, иногда пересыхающий ручей, впадающий в Каспийское море у пос. Турали-1. В настоящее время территория застроена.

Методы исследований

Гидрогеологическое районирование территории г. Каспийска. При районировании территории были использованы принципы таксономических единиц, предложенные ранее в работах Кац Д. М., Шестаков В. М. Коэффициенты фильтрации были взяты по аналогии с гранулометрическим составом [Кац, Шестаков, 1981] и кустовых откачек, проведенных на площади г. Каспийска. В результате гидрогеологического районирования были выделены зоны дренированности и гидрогеологические районы. Зоны дренированности (З-Д) были выделены по уклону релье-

фа: как зоны дренированные (уклон рельефа $>0,01$). Транзитная область движения грунтовых вод характеризуется как зоной дренированной (З – Д) и слабо дренированной (З – СД), где уклон рельефа меняется от 0,02 до 0,005. Область разгрузки грунтовых вод выражена весьма слабодренированной зоной (З – ВСД). Площади разгрузки грунтовых вод в естественных условиях выражены солончаками и солонцами с характерным белесым видом.

Таблица 1 / Table 1

**Результаты химического анализа проб грунтовых вод,
отобранных в г. Каспийске /
Results of chemical analysis of ground water samples taken in Kaspiysk**

Дата / Date	Место проведения работ / Place of work	Сухой остаток, мг/л / Dryresidue, mg/l	Анионы, мг/л / Anions, mg/l			Катионы, мг/л / Cations, mg/l			pH
			HCO ₃ '	SO ₄ ''	Cl'	Ca''	Mg''	K'+Na'	
02.2013	Жилой дом Ак-Гель «НУР», г. Махачкала / Residential building Ak-Gel «NUR», Makhachkala	21200	1586	9120	4260	701	1098	4853	7,6
03.2012	Пр-т Газовиков, г. Махачкала / Gazovikov Av., Makhachkala	15770	451	4800	5460	700	1440	2502	8,0
05.2004	Ул. Ленина, 15 / st. Lenina, 15	1360	586	480	57	150	43	235	7,0
11.2006	Гостиница «Лагуна 2» / Hotel «Laguna 2»	3120	854	960	603	200	91	770	7,2
03.2010	МКР-9, Ю-В от Хазар / MKR-9, SE from Khazar	89200	1098	30960	26625	1804	2867	25024	7,4
04.2015	МКР-10. П. 4, кольцо / MKR-10. P. 4, ring	85800	1342	30024	25382	1703	2623	24437	6,9
05.2019	МКР-10 – д. сад / MKR-10 – kindergarten	77200	1037	27360	22542	1503	1708	23161	6,6
08.2017	МКР-7, ул. Хизроева / MKR-7, st. Khizroeva	85000	1159	17520	35925	1703	1891	26588	7,2
09.2012	Ипподром, г. Махачкала / Hippodrome, Makhachkala	46000	793	10800	14910	541	555	13455	7,3
05.2004	Приморская, 49 / Primorskaya, 49	2160	488	600	461	1000	49	563	7,0
06.2004	пер. Школьный, 5 / Shkolny Lane, 5	7739	854	3072	426	421	220	1173	6,7
07.2004	МКР Кирпичный / MKR Brick	1580	647	475	224	189	97	215	7,2
08.2016	МКР-11, уч. 32 / MKR-11, account. 32	74800	1464	18240	27960	10002	854	24472	7,0
02.2016	«Бриз», ресторан / «Breeze» restaurant	1600	850	480	114	170	49	770	7,0

Таблица 2 / Table 2

Гидрогеологические условия г. Каспийска по данным инженерно-геологических изысканий / Hydrogeological conditions of the north-western area of Kaspiysk according to engineering and geological surveys

№ п/п / No. p/p	Место проведения работ / Place of work	Дата / The date	Глубина залегания грунтовых вод (ГВ), м / Ground water depth (GW), m	Категория грунтов по сейсмичности / Soil category by seismicity	Коэффициент водопроводимости (КВ), м ² /сут / Water conductivity coefficient (KV), m ² /day		Гидрогеологические районы (ГР), ГР-1; ГР-2; ГР-3 / Hydrogeological regions (GR), GR-1; GR-2; GR-3	Глубина залегания коренных пород (N 1s), м / Depth of bedrock occurrence (N 1s), m	Уклон рельефа / Terrain slope
					Верхней толщи / Upper stratum	Нижней толщи / Lower stratum			
1	МКР-10, 200 м на юг от стадиона «Анжи-Арена» / MKR-10, 200 m south of the Anzhi-Arena stadium	04.2019	1,9	2	2	-	2-3	7,0	0,005
2	МКР «Кемпинг», кольцо скоростной трассы / MKR «Camping», ring of the highway	05.2015	1,3	2	2	-	2-3	8,0	0,005
3	Гостиничный комплекс в г. Каспийске / Hotel complex in Kaspiysk	10.2014	2,0-4,0	2-3	30	-	1	9,0	0,01
4	«Дом отдыха по ул. Халилова, 1Г / «Recreation house on the str. Khalilova, 1G	12.2017	2.0-4,0	3	40	-	1	12-13	0,005
5	«Многоквартирные жилые дома с магазинами»/ «Apartment buildings with shops»	06.2016	2,0	2	1-2	-	2-3	4,0	0,005
6	Жилой комплекс «Позитив» / Residential complex «Positive»	03.2017	1,6	2	1	-	3	6,0	0,005
7	7-миэт. ж/д по ул. Ленина (церковь) / 7 th fl. railway on the street. Lenin (church)	08.2015	2,0	3	50	-	1	12,0	0,005
8	Детский сад №3 / Kindergarten №3	04.2016	2,0	3	40	40	1	13-15	0,005
9	12-тиэт. жилой дом по ул. Халилова, 3а / 12 floor residential building on str. Khalilova, 3a	03.2015	4,0	3	70	20	1	16	0,005
10	Блок «Фэмели-В»/Block «Family-V»	12.2017	1,0	2	1-2	-	2-3	3-5	0,005
11	МКР-7 12-тиэт. дом / MKR-7 12 floor house	03.2014	1,0	2	1-2	-	2-3	4-5	0,005

12	Линия 29а, МКР Кемпинг / Line 29a, MKR Camping	12.2015	1,0	2	2	-	2	9,0	0,005
13	МКР Центральный / MKR Central	03.2015	1,0	2	1-2	-	2-3	4-5	0,005
14	МКР Центральный, поз. 34, 35,36 / MKR Central, pos. 34, 35, 36	03.2015	1,0	2	1-2	-	2-3	4-5	0,005
15	В МКР-10, поз. 4 / in MKR-10, pos. 4	04.2015	1,0	2	1-2	-	2-3	4-5	0,005
16	Блок С / Block C	02.2016	1,0	2	1-2	-	2-3	4-5	0,005
17	МКР-11, уч. 32 / MKR-11, account. 32	08.2016	1,0	2	1	-	3	7-9	0,005
18	Блок Д / Block D	10.2016	1,0	2	1-2	-	2-3	3-4	0,005
19	ул. Хизроева / str. Khizroeva	07.2016	2,0	2	1	-	3	4-5	0,005
20	ул. Батырая / str. Baturay	11.2013	1,0	2	2-4	-	2	5	>0,01
21	ул. Байрамова, 7а / st. Bayramova, 7-a	10.2017	1,5	2	1-2	-	2-3	4,0	0,01
22	ул. Абдулманапова / str. Abdulmanapova	12.2011	1,5	2	50	-	1	8,0	0,01
23	Бриз / Breeze	2016	3,5	3	50	-	1	14,0	0,005
24	ул. Мира, 3 / str. Mira, 3	09.2012	2,5	2	5-10	-	1	6,0	>0,01
25	ул. Орджоникидзе, 17, 21 / str. Ordzhonikidze, 17, 21	08.2012	2,5	2	5-10	-	1	5,0	>0,01
26	Спортзал (кемпинг) / Gym (camping)	10.2019	2,8	2	30	1	1	8,0	0,005
27	ул. Хизроева (напротив администрации) / str. Khizroeva (opposite the administration)	12.2010	1,5	2	1	-	3	4-5	>0,01
28	12-тиэт. в МКР-9 в юго-вост. «Хазар» / 12 floor in MKR-9 in the south-east. «Khazar»	03.2010	1,5	2	1	-	3	4,0	0,005
29	Ленина, 15, 9-тиэт. дом / Lenina, 15, 9 th floor house	04.2010	2,5	2	20	-	1	5,0	0,005
30	ул. Махачкалинская, 4 / str. Makhachkala, 4	08.2011	1,2	2	1-2	-	2-3	4,0	0,01
31	ул. Байрамова, 27 / str. Bayramova, 27	11.2011	1,5	2	4	-	2	7,0	0,01
32	МКР-6, 32 поз., при въезде слева к морю 250 м / MKR-6, 32 pos., at the entrance on the left to the sea 250 m	08.2010	2,0	2	15	-	1	5,0	0,005
33	ул. Советская, 10 / str. Soviet, 10	01.2011	2,0	2	30	-	1	6,0	0,01
34	Эл. подстанция / Electro. substation	10.2009	1,0	2	2	5	2	5,0	0,01
35	ул. Кирова, 68а / str. Kirova, 68a	08.2017	1,0	2-3	60	-	1	9,0	0,005

Влияние грунтов на сейсмичность. Несущие свойства грунтов зависят от их обводнения, связанные с суммами атмосферных осадков, с подъемами и опусканиями уровней морей, озер, рек, а также от антропогенной деятельности, в том числе, от площадей асфальта и крыш домов [Cooper et al., 1965; Медведев, 1962; Заалишвили, 2009; Shi et al., 2015; Копылова, 2009; Zhang et al., 2018; Chao et al., 2018; Ivanov et al., 2018; Yu et al., 2015].

Также можно отметить, что естественной разгрузке грунтовых вод может препятствовать уплотнение грунтов в результате их обводнения под фундаментами зданий. В качестве примера можно отметить случай озера Ак-Гель в г. Махачкале, который подвергся обмелению, где именно был нарушен естественный приток грунтовых вод в озеро, в процессе строительства многоэтажных домов со стороны п. Тарки, с фундаментами до 4 метров глубиной. Сейсмические свойства грунтов под зданиями и сооружениями и уровень грунтовых вод изменяются и в процессе строительства и эксплуатации объектов под воздействием техногенных явлений. Хотя принято, что влияние грунтовых вод при их уровне ниже 10 м не существенно.

В четвертичное время исследуемая территория испытывала поднятие. Лестница четвертичных морских террас свидетельствует о постепенном воздымании в течение всего времени с равной скоростью на всем протяжении Каспийского побережья [Федоров, 1957]. Наибольшее распространение на территории города Каспийска имеют место суглинки и глины дагестанской и сартасской террас, которые находятся в обводненном состоянии в виду высокого уровня грунтовых вод.

Для расчетов приращения сейсмической интенсивности на обводненных территориях используется только данные по скоростям распространения упругих поперечных волн, которые не зависят от обводненности грунта. По анализу инженерно-геологических и геофизических условий территории города Каспийска (Отчет о сейсмическом микрорайонировании территории г. Каспийска, 1990), глины на глубине 3 м имеют скорости поперечных волн 280 м/с, а суглинки – 310 м/с. Средняя плотность для глин и суглинков, согласно экспликация к карте инженерно-геологического районирования, составляет 1,95 кг/м³. Согласно пункту 5.1 РСН60–86 для грунтов II категории $V_p/V_s = 2$. Исходя из этого, наши средние грунты в необводненном состоянии должны иметь скорости продольных волн 580 м/с.

В связи с изложенным выше, необходимо провести работы по созданию цифрового комплекса (цифровая платформа), с использованием геоинформационных технологий и специализированного дистанционного зондирования (далее СДЗ), в рамках разработки единой государственной геоинформационной системы «Цифровая геологическая карта» Республики Дагестан (ГИС ЦГК РД), в части выявления опасности, обработки и мониторинга сейсмической обстановки. Для этого необходимо использовать результаты работ по сеймотектоническому исследованию и по сейсмическому микрорайонированию территории г. г. Махачкалы, Каспийска, Дербента и других объектов. Подобный опыт работ имеется в Институте геологии ДФИЦ РАН [Черкашин и др., 2003; Ибаев и др., 2008].

Можно отметить также необходимость проведения сейсмического микрорайонирования территории г. Каспийска, в связи с расширением города и изменениями грунтовых условий под зданиями и сооружениями.

Результаты работ и их обсуждение

Гидрогеологические районы были выделены по соотношению водопроницаемости верхней и нижней покровных толщ до глубины залегания регионального водоупора.

Гидрогеологический район 1 (ГР-1) представляет собой случай залегания двухслойной тощи: сверху хорошо проницаемая водоносная толща с мощностью от 5 до 10 м. Коэффициент водопроницаемости (КВ) верхней толщи составляет от 4 до 50 м²/сут и более, а нижней толщи – от 0,0 м²/сут и более. Глубина залегания регионального водоупора меняется в пределах 5-16 м. ГР-1 характерен для территории новокаспийской террасы морю от ул. Ленина; по ул. Халилова – парковая зона. На рисунках 2 и 3 показаны типичные инженерно-геологические разрезы, демонстрирующие залегание покровных толщ на исследуемом районе.

Гидрогеологический район 2 (ГР-2) представляет собой случай залегания одной водоносной толщи мощностью от 5 до 10 м с коэффициентом водопроницаемости (КВ) до 4 м²/сут. Инженерно-геологические разрезы, характерные для гидрогеологического района 2 это площади многоэтажных домов МКР-9, МКР-10, а также ул. Батырая, Байрамова, 29 линия).

Гидрогеологический район 3 (ГР-3) представлен слабопроницаемыми одной или двухслойной толщей, с КВ равным или менее 1 м²/сут. Глубина залегания регионального водоупора меняется в пределах 5-14 м, более часто до 6 м. Примерами служат следующие объекты: ул. Хизроева, ул. Махачкалинская, площади МКР-9, МКР-10, МКР Центральный. Перечисленные площади ГР-3 (объекты) с сочетанием весьма слабой зоной дренированности (З-ВСД) являются барражными участками, препятствием для потоков грунтовых вод, их оттока.

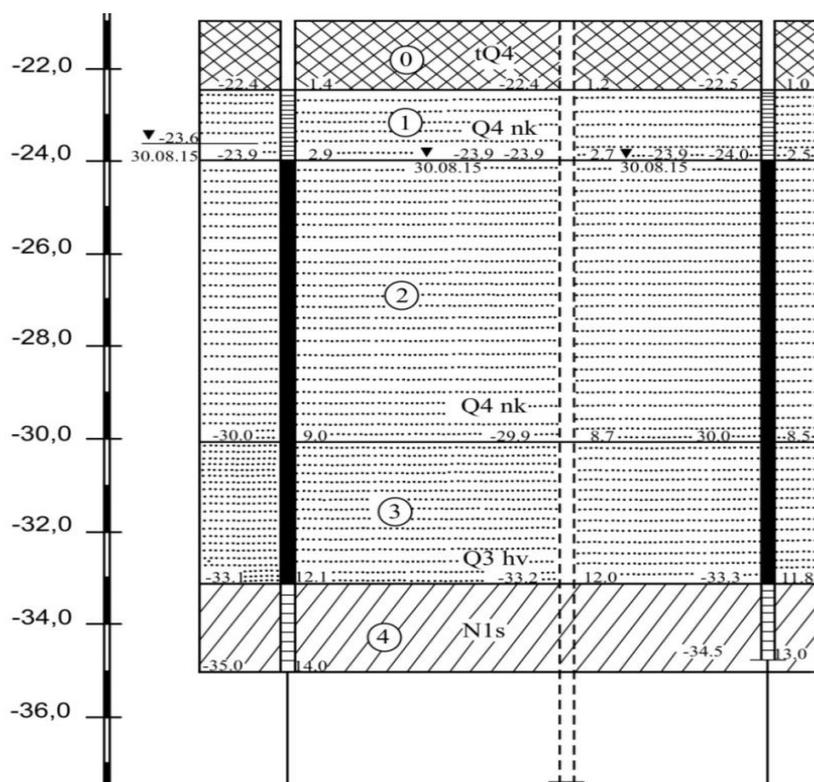


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез по ул. Ленина (бывший летний кинотеатр).
0 – Насыпной грунт, 1 – Песок мелкий маловлажный, 2 – Песок мелкий водонасыщенный,
3 – Песок пылеватый, 4 – Суглинок полутвердый /

Fig. 2. Engineering-geological section on Lenin Street (former summer cinema).
0 – Bulk soil, 1 – Shallow an dlow – moisturesand, 2 – Shallowwater-saturatedsand,
3 – Dustysand, 4 – Semi-solidloam

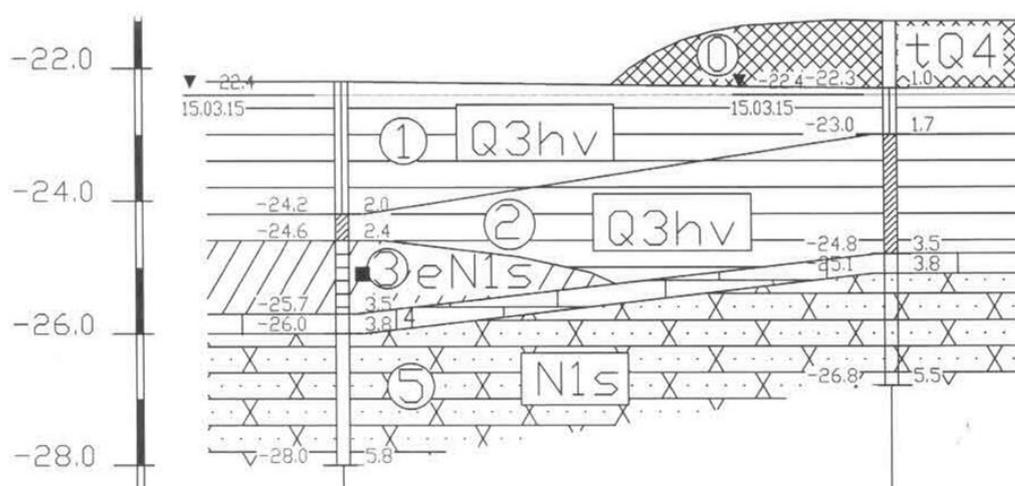


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез по ул. Ленина, въезд справа (район Центральный):
0 – насыпной грунт, 1 – глина тугопластичная, 2 – глина мягкопластичная, 3 – суглинок
элювиальный, 4 – известняк, 5 – песчаник /

Fig. 3. Engineering-geological section on Lenin Street, the entrance is on the right. (Central district):
0 – Bulksoil, 1 – Clayis refractory, 2 – Clayis soft-plastic, 3 – Eluvial loam, 4 – Limestone, 5 – Sandstone

Выводы

1. Проведенное гидрогеологическое районирование по точкам позволяет оценить территорию по процессу подтопления и необходимости проведения работ, как создание горизонтального, вертикального или комбинированного типа дренажа или сооружение ливневого стока.

2. Процесс подтопления на территории города, слабо и весьма слабо дренированной, при дальнейшем строительстве будет усиливаться, особенно многоэтажными жилыми домами.

3. Показана площадь древней лагуны, с грунтовыми водами, которые соответствуют рассолам. Это вызвано естественными природными условиями при аридном климате: как весьма слабо дренированной зоной; верхними слабопроницаемыми отложениями – глинами и суглинками с отсутствием песчаных слоев. Здесь расходная часть баланса грунтовых вод выражена испарением.

Литература

1. Брод И. О. Тектоника и нефтеносность Восточного Предкавказья. // Советская геология. – 1938. – Т. VIII. № 7. – С. 3-23.
2. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
3. Ибаев Ж. Г., Мамаев С. А. Общие принципы разработки постоянно действующей гидрогеолого-математической модели Терско-Кумского артезианского бассейна. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2008. – № 52. – С. 260-264.
4. Кац Д. М., Шестаков В. М. Мелиоративная гидрогеология. – М.: Недра, 1981. – 296 с.
5. Кондаков В. М., Кондакова Н. В. Интерпретация фильтрационных свойств водоносных песков. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2019. – № 2 (77). – С. 50-54.

6. Кондаков В. М., Мамаев С. А., Мусаев М. А., Мамаев А. С. Инженерно-геологические условия северо-западной территории г. Махачкалы в связи с подтоплением. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11 (3). – С. 45-54. DOI: 10.46698/VNC. 2021.18.33.004.
7. Копылова Г. Н. Оценка информативности уровнемерных наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки). // *Геофизические исследования*. – 2009. – Т. 10. №2. – С. 56-68.
8. Мамаев С. А., Юсупов А. Р., Мамаев А. С., Юсупов З. А. Сейсмоструктура высокогорной части Восточного Кавказа и перспективы газоносности на примере естественного проявления газа с. Цушар (Дагестан). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 150-163. DOI: 10.46698/VNC. 2020.88.37.009
9. Медведев С. В. *Инженерная сейсмология*. – М.: Госстройиздат, 1962. – 260 с.
10. Островский В. Н., Островский Л. А., Шахнова Р. К. Региональные гидрогеологические классификации и картографирование. // В сб. научн. тр.: *Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и экогеологии*. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1994. – С. 5-12.
11. Ревелис И. Л., Кучеренко И. В. *Инженерно-геологический очерк территории города Махачкалы*. – Махачкала: Дагестанское книжное издательство, 1969. – 88 с.
12. Федоров П. В. Стратиграфия четвертичных отложений и история развития Каспийского моря. // *Тр. ГИН АН СССР*. – 1957. – Вып. 10. – 304 с.
13. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. *Геотектоника с основами геодинамики*. / Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 480 с.
14. Черкашин В. И., Мамаев С. А., Ибаев Ж. Г., Маммаев А. О. Создание информационных электронных гидрогеологических карт с применением современных ГИС-технологий, мониторинг и анализ геоданных. // *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. – 2003. – №49. – С. 85-93
15. Chao N., Luo Z., Wang Z., Jin T. Retrieving groundwater depletion and drought in the Tigris-Euphrates basin between 2003 and 2015. // *Ground Water*. – 2018. – Vol. 56. No. 5. – pp. 770-782.
16. Cooper H. H., Bredehoeft J. D., Papadopoulos I. S., Bennet R. R. The response of well aquifer system to seismic waves. // *J. Geophysical Research*. – 1965. – Vol. 70. – pp. 3915-3926.
17. Ivanov P., Davis P., Sizov N., Pozdniakov S. Use of groundwater level fluctuations near an operating water supply well to estimate aquifer transmissivity. // *Ground Water*. 2018. – Vol. 59. No. 1. – pp. 49-58.
18. Shi Zh., Wang G., Manga M., Wang C.-Y. Mechanism of coseismic water level change following four great earthquakes – insights from coseismic responses throughout the China semainland. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2015. – Vol. 430. – pp. 66-74. DOI: 10.1016/j.epsl. 2015.08.012
19. Yu Z., Zhang L., Jiang P., Papelis C., Li Y. Study on water- rock interactions of trace elements in groundwater with leaching experiments. // *Ground Water*. – 2015. – Vol. 53. No. S1. – pp. 95-102.
20. Zhang Sh., Shi Zh., Wang G., Zhang Zh. Quantitative Assessment of the Mechanisms of Earthquake-Induced Groundwater-Level Change in the MP Well, Three Gorges Area. // *Pure Appl. Geophys.* – 2018. – pp. 2475-2484.

References

1. Brod I. O. Tectonics and oil content of the Eastern Ciscaucasia. *Soviet geology*. 1938. Vol. 8. No. 7. pp 3-23. (In Russ.)
2. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka. 2009. 305 p. (In Russ.)
3. Ibaev Zh. G., Mamaev S. A. General principles for the development of a permanent hydrogeological and mathematical model of the Terek-Kuma artesian basin. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center, RAS*. 2008. No. 52. pp. 260-264 (In Russ.)

4. Kats D.M., Shestakov V.M. Ameliorative hydrogeology. Moscow. Nedra, 1981. 296 p. (In Russ.)
5. Kondakov V.M., Kondakova N.V. Interpretation of filtration properties of water-bearing sands. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center, RAS. 2019. No. 2 (77). pp. 50-54. (In Russ.)
6. Kondakov V.M., Mamaev S.A., Musaev M.A., Mamaev A.S. Engineering and geological conditions of the north-western territory of Makhachkala due to flooding. Geology and Geophysics of Russian South. Vol. 11 (3). pp. 45-54. DOI: 10.46698/VNC. 2021.18.33.004. (In Russ.)
7. Kopylova G.N. Evaluation of the information content of water level observations in wells for the purpose of hydrogeodynamic precursors of earthquakes detection (on the example of Kamchatka). Geophysical research. 2009. Vol. 10. No. 2. pp. 56-68. (In Russ.)
8. Mamaev S.A., Yusupov A.R., Mamaev A.S., Yusupov Z.A. Seismotectonics of the High Mountain Part of the Eastern Caucasus and the Prospects of Gas Content on the Example of the Natural Manifestation of Gas in Tsuschar Village (Dagestan). Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 150-163. DOI: 10.46698/VNC. 2020.88.37.009 (In Russ.)
9. Medvedev S.V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 260 p. (In Russ.)
10. Ostrovsky V.N., Ostrovsky L.A., Shakhnova R.K. Regional hydrogeological classifications and mapping. Collection of scientific papers: Modern problems of hydrogeology, engineering geology and ecogeology. Moscow. VSEGINGEO. 1994. pp. 5-12. (In Russ.)
11. Revelis I.L., Kucherenko I.V. Engineering-geological sketch of the territory of the city of Makhachkala. Makhachkala. Dagestan publishing house. 1969. 88 p. (In Russ.)
12. Fedorov P.V. Stratigraphy of Quaternary deposits and history of the Caspian Sea development. Proceedings of Geological institute of AS USSR. 1957. Issue 10. 304 p. (In Russ.)
13. Khain V.E., Lomize M.G. Geotectonics with the basics of geodynamics. Textbook. Moscow. Publishing House of Moscow State University. 1995. 480 p. (In Russ.)
14. Cherkashin V.I., Mamaev S.A., Ibaev Zh.G., Mammaev A.O. Creation of information electronic hydrogeological maps using modern GIS technologies, monitoring and geodata analysis. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center, RAS. 2003. No. 49. pp. 85-93. (In Russ.)
15. Chao N., Luo Z., Wang Z., Jin T. Retrieving groundwater depletion and drought in the Tigris-Euphrates basin between 2003 and 2015. Ground Water. 2018. Vol. 56. No. 5. pp. 770-782.
16. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopulos I.S., Bennet R.R. The response of well aquifer system to seismic waves. J. Geophysical Research. 1965. Vol. 70. pp. 3915-3926.
17. Ivanov P., Davis P., Sizov N., Pozdniakov S. Use of groundwater level fluctuations near an operating water supply well to estimate aquifer transmissivity. Ground Water. 2018. Vol. 59. No. 1. pp. 49-58.
18. Shi Zh., Wang G., Manga M., Wang C.-Y. Mechanism of coseismic water level change following four great earthquakes – insights from coseismic responses throughout the China mainland. Earth and Planetary Science Letters. 2015. Vol. 430. pp. 66-74. DOI: 10.1016/j. epsl. 2015.08.012
19. Yu Z., Zhang L., Jiang P., Papelis C., Li Y. Study on water-rock interactions of trace elements in groundwater with leaching experiments. Ground Water. 2015. Vol. 53. No. S1. pp. 95-102.
20. Zhang Sh., Shi Zh., Wang G., Zhang Zh. Quantitative Assessment of the Mechanisms of Earthquake-Induced Groundwater-Level Change in the MP Well, Three Gorges Area. Pure Appl. Geophys. 2018. –pp. 2475-2484.

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.47+551.243.4 (470.621)

DOI: [10.46698/VNC.2022.74.71.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.74.71.002)

Оригинальная статья

Нижнетебердинский серпентинитовый массив:
состав и эволюция (Большой Кавказ)Ю. В. Попов¹, О. Е. Пустовит², С. П. Кубрин¹, А. Ю. Никулин¹¹Южный федеральный университет, Россия, 344103,
г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40, e-mail: popov@sfnu.ru;²ООО «ГеоБазисПроект», Россия, 344018,
г. Ростов-на-Дону, ул. Текучева, д. 246, офис 39.

Статья поступила: 20.06.2022, доработана: 15.07.2022, одобрена в печать: 25.07.2022

Резюме: Актуальность работы. В тектонической структуре складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа серпентиниты связаны преимущественно с зоной Передового хребта, где они ассоциируют с герцинскими тектоническими покровами или крупными разломами, ограничивающими блоки доверхнепалеозойских кристаллических пород. Сведения как об условиях формирования протолита кавказских апогипербазитов (включая их формационную принадлежность и геодинамическую приуроченность), так и об их метаморфических трансформациях в коровых условиях остаются дискуссионными, что в определенной мере связано с недостаточной изученностью минерального состава. **Цель работы** – получение данных о минеральном составе серпентинитов Нижнетебердинского массива, анализ особенностей состава зональных хромшпинелидов, получение данных об условиях формирования и преобразования апогипербазитов. **Методы исследования.** Рентгенофазовый анализ, электронно-зондовый микроанализ и электронная микроскопия, мессбауэровская спектроскопия. **Результаты работы.** Нижнетебердинские серпентиниты имеют петельчатую текстуру и хризотил-лизардитовый состав; с серпентинами ассоциируют магнетит, хромшпинелиды, гематит, хлориты, кварц, кальцит, магнезит, доломит, брусит. Хромшпинелиды по строению и составу разделяются на две группы. Одна группа представлена округлыми однородными массивными зернами алюмохромитового состава (Cr# 0,69-0,73, Mg# 0,47-0,51), приуроченными к зонами вязкопластических деформаций породы. Другая – неправильной формы зональными зернами с хромпикотитовыми ядрами (Cr# 0,36-0,43, Mg# 0,66-0,72) и феррихромит – хроммагнетитовыми оторочками. Формирование хризотил-лизардитовой ассоциации происходило в условиях низкотемпературной зоны зеленосланцевой фации в окислительной обстановке под воздействием гидротермальных растворов, насыщенных трехвалентным железом, кремнеземом и марганцем. В этих условиях образовались характерные «атолловые» пористые хромшпинелиды, обогащенные SiO₂ и MnO за счет переработки гидротермальными растворами уже зонированных (претерпевших метаморфическую перекристаллизацию) хромшпинелидов. Состав реликтовых ядер хромшпинелидов отвечает офиолитовому тренду. Составы нижнетебердинских «смещены» в область, характерную для абиссальных перидотитов. Эта тенденция согласуется с ассоциацией серпентинитов со среднепалеозойскими филлитами и граувакковыми породами Тоханского тектонического покрова, относимыми некоторыми авторами к комплексу преддугового бассейна.

Ключевые слова: Нижнетебердинский массив, серпентинитовый меланж, серпентинит, хромшпинелиды, хромпикотит, алюмохромит.

Для цитирования: Попов Ю. В., Пустовит О. Е., Кубин С. П., Никулин А. Ю. Нижнетебердинский серпентинитовый массив: состав и эволюция (Большой Кавказ). *Геология и Геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 18-33. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.71.002

DOI: [10.46698/VNC.2022.74.71.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.74.71.002)

Original paper

Nizhneteberdinskiy serpentinite massif: composition and evolution (Greater Caucasus)

Yu. V. Popov¹, O. E. Pustovit², S. P. Kubrin¹, A. Yu. Nikulin¹

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

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

Received: 20.06.2022, revised: 15.07., accepted: 25.07.

Abstract: Relevance. In the tectonic folded-boulder structure of the Greater Caucasus serpentinites are mainly associated with the zone of the Peredovoy Ridge, where they are associated with Hercynian tectonic sheets or large faults limiting blocks of pre-Paleozoic crystalline rocks. Information on the conditions of formation of the Caucasian apohyperbasites protoliths (including their formational affiliation and geodynamic confinement), as well as their metamorphic transformations in crustal conditions remain debatable, which is largely due to the insufficient study of the mineral composition. **The aim of the work** is to gain data on the mineral composition of serpentinites of the Nizhneteberdinskiy massif, to analyze specific features of the zonal chromespinelides' composition, to receive data on formation conditions and transformation of apohyperbasites. **Methods.** X-ray phase analysis, electron-probe microanalysis and electron microscopy, Mössbauer spectroscopy. **Results.** The Nizhneteberdinskiy massif' serpentinites have a loop texture and chrysotile-lysardite composition; magnetite, chrome-spinelides, hematite, chlorites, quartz, calcite, magnesite, dolomite, and brucite are associated with serpentines. Chrome-spinelides by structure and composition are subdivided into two groups. One group consists of rounded homogeneous massive grains of aluminomagnesian composition (Cr# 0.69-0.73, Mg# 0.47-0.51), which are confined to the viscoplastic deformation zones of the rocks. The other is irregularly shaped zoned grains with chromepicotite cores (Cr# 0.36-0.43, Mg# 0.66-0.72) and ferrichromite – chrome-magnetite rims. The formation of the chrysotile-lysardite association occurred in the low-temperature zone of the greenschist facies in an oxidizing environment under the influence of hydrothermal solutions saturated with trivalent iron, silica, and manganese. Under these conditions, characteristic “atoll” porous chromespinelides enriched with SiO₂ and MnO were formed due to reprocessing by hydrothermal solutions of already zoned (affected by metamorphic recrystallization) chromespinelides. The composition of relic chromespinelide cores corresponds to the ophiolitic trend. The compositions of the Nizhneteberdinskiy massif are “shifted” to an area of abyssal peridotites. This trend is consistent with the association of serpentinites and Middle Paleozoic phyllites and graywacke rocks of the Tohan tectonic cover, referred to the complex of the pre-arc basin by some authors.

Keywords: Nizhneteberdinskiy massif, serpentinite melange, serpentinite, chrome-spinelides, chromepicotite, aluminomagnesian.

For citation: Popov Yu. V., Pustovit O. E., Kubin S. P., Nikulin A. Yu. Nizhneteberdinskiy serpentinite massif: composition and evolution (Greater Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South* (In Russ.). 2021. 11 (1): 18-33. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.71.002.

Введение

В тектонической структуре складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа серпентиниты связаны преимущественно с зоной Передового хребта, где они ассоциируют с герцинскими тектоническими покровами или крупными разломами, ограничивающими блоки доверхнепалеозойских кристаллических пород. В состав

ве покровно-надвиговых ассоциаций серпентиниты локализованы в виде пластин между тектоническими чешуями (например, в составе Кишинского выступа они приурочены к контакту Ацгаринского и Кизилкольского покрова), либо связаны с северным флангом покровов Передового хребта (Беденский, Нижнетебердинский массивы, ассоциирующие с Тоханским покровом; тектонический меланж в районе Даховского выступа, Тхачский массив).

Сведения как об условиях формирования протолита кавказских апогипербазитов (включая их формационную принадлежность и геодинамическую приуроченность), так и об их метаморфических трансформациях в коровых условиях остаются дискуссионными, что в определяющей мере связано с недостаточной изученностью минерального состава. Приведенные в фондовых и опубликованных работах сведения, основанные практически исключительно на результатах оптической петрографии, указывают на антигорит-хризотилловый (с разным соотношением этих серпентинов) состав и присутствие микроструктурных особенностей, свойственных гарцбургитам [Снежко, 1985; Снежко В. А., Снежко В. В., 2019]. Вместе с тем, полученные нами данные инструментальных исследований отражают более сложную ситуацию [Роров et al., 2021]: состав пород изменяется в выходах, занимающих разную структурную позицию, от преимущественно лизардитового до хризотил-антигоритового. Акцессорные зональные хромшпинелиды, служащие важнейшим индикатором условий образования протолита и его трансформаций [Irvine, 1965, 1967; Leblanc, Nicolas, 1992; Barnes, Roeder, 2001; Dick, Bullen, 1984; Ishii et al., 1992; Bloomer et al., 1995; Parkinson, Pearce, 1998; Barnes, 2000 и др.], в кавказских серпентинитах различаются характером зональности и составом [Роров, 2021; Пустовит, 2021]. Это определяет актуальность изучения минералого-петрографических особенностей.

В статье приводятся результаты изучения серпентинитов Нижнетебердинского массива, расположенного на северном фланге герцинской тектонической зоны Передового хребта в бассейне р. Теберда (рис. 1). Массив по тектоническому контакту ассоциирует со среднепалеозойской толщей Тоханского тектонического покрова, комплексы которого отождествляются с фронтальным бассейном [Греков, Омельченко 2005; Греков, 2006] или задуговым бассейном [Баранов, 1990] ранне-среднепалеозойской Большекавказской палеоостровной дуги.

Методика исследований

Минеральный состав серпентинитов определен методами рентгенофазового анализа на дифрактометре «ARLX'TRA»; использовано характеристическое излучение медного анода (длины волн $\text{CuK}\alpha_1$ 1,5406 Å, $\text{CuK}\alpha_2$ 1,5444 Å). Идентификация фаз серпентинитов и второстепенных минералов проводилась при помощи рентгенографической базы PDF-2. Серпентины идентифицированы по ярким пикам на углах $12,08^\circ$ (001) и $24,36^\circ$ (002); поскольку различные виды серпентинитов трудны в разделении по базальным отражениям, то анализировались прочие отражения и их форма (рис. 2). Рефлексы лизардита выражены отчетливо; помимо базальных, они наблюдаются на углах $19,21^\circ$ (100), $35,80^\circ$ (111), $42,01^\circ$ (112), $50,82^\circ$ (113), $60,14^\circ$ (300), $61,60^\circ$ (114); индексы указаны в соответствии с карточкой PDF № 50-1625. Постоянное отклонение положения пиков от картотечных в сторону меньших углов свидетельствует о некотором относительно повышенном отношении Fe/Mg в лизардите. Пики хризотила на рентгенограммах более размыты (хризотил в образцах

менее окристаллизован); помимо базальных, они проявлены на углах $19,46^\circ$ (110), два пика – $33,66^\circ$ (130) и $34,41^\circ$ (131) – заключены в области гало с максимумом на $\sim 34,4^\circ$, а также на углах $36,56^\circ$ (-132) и $60,42^\circ$ (029) (карточка PDF № 25-645).

Изучение микроструктурных особенностей серпентинитов, зональности и элементного состава хромшпинелидов проводилось в напыленных углеродом полированных аншлифах методами электронно-зондовых исследований, включающими проведение количественного микроанализа и элементное картирование. Исследования выполнены на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA II LMU, оснащённом системами энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT и волнодисперсионного анализа INCA Wave 700 производства фирмы OXFORD Instruments Analytical. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 kV с использованием стандартов «Micro-Analysis Consultants Ltd.». Проанализировано более 20 зерен, характеризующих разные стадии преобразования хромшпинелидов.

Мёссбауэровский спектр серпентинита получен с помощью спектрометра MS1104Em. В качестве источника гамма-квантов использовался ^{57}Co в матрице Rh. Модельная расшифровка спектров осуществлялась в программе SpectrRelax [Matsnev, Rusakov, 2012]. Изомерные сдвиги вычислялись относительно металлического $\alpha\text{-Fe}$.

Результаты работы и их обсуждение

Серпентиниты Нижнетебердинского массива сильно перемяты, разлинованы, превращены в тектонические брекчии («тектонические окатыши») (рис. 1.3-1.4). Преобладают хризотил-лизардитовые (с переменным соотношением этих фаз) разности спетельчатой (в том числе микропетельчатой и баститовой) текстурой. С серпентинами ассоциируют магнезит, магнетит, хлориты. В некоторых образцах лизардит-хризотиловых серпентинитов отмечается высокое содержание магнезита и кварца, а также присутствие доломита и кальцита (рис. 2, обр. 20601-1), что указывает на интенсивную гидротермальную переработку пород. В ряде не содержащих кварц образцов отмечается присутствие брусита (рис. 2, обр. 20603-2).

Мессбауэровский спектр образца серпентинита (рис. 3) состоит из трех Зеemannовских секстетов и трех парамагнитных дублетов. Параметры указанных компонентов приведены в табл. 1. Секстет SH обладает изомерным сдвигом величина, которого соответствует ионам Fe^{3+} [Menil and Systematic, 1985]. Значения сверхтонкого магнитного поля (H) находится в диапазоне значений, наблюдаемых для гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) [Van Der Woud, 1966; Küdning, Bömmel, 1966]. Изомерный сдвиг секстета SM1 характерен для ионов Fe^{3+} в тетраэдрическом кислородном окружении [Menil and Systematic, 1985]. В то же время изомерный сдвиг секстета SM2 обладает значением меньшим, чем соответствующие ионам Fe^{2+} , но большими, чем для ионов Fe^{3+} [Menil and Systematic, 1985]. Такие параметры характерны для соединений, в котором имеется Веервеевский электронный обмен; к числу таких соединений относится магнетит. Дублеты D1 и D2 обладают соответствующие ионам Fe^{2+} изомерными сдвигами. Значения сверхтонких параметров дублета D1 близки к значениям, наблюдаемым для ионов железа в клинохлоре [Borggaard et al., 1982; Ballet et al., 1985]. Параметры дублета D2 находятся в диапазоне значений характерных для серпентинитов [Rozenon et al., 1979; Malysheva et al., 1976]. При этом значение квадрупольного расщепления не отвечает типичному для антигорита ($\sim 2,5$ мм/сек), в котором в октаэдрическом слое преобладает двухвалентное железо [Taylor

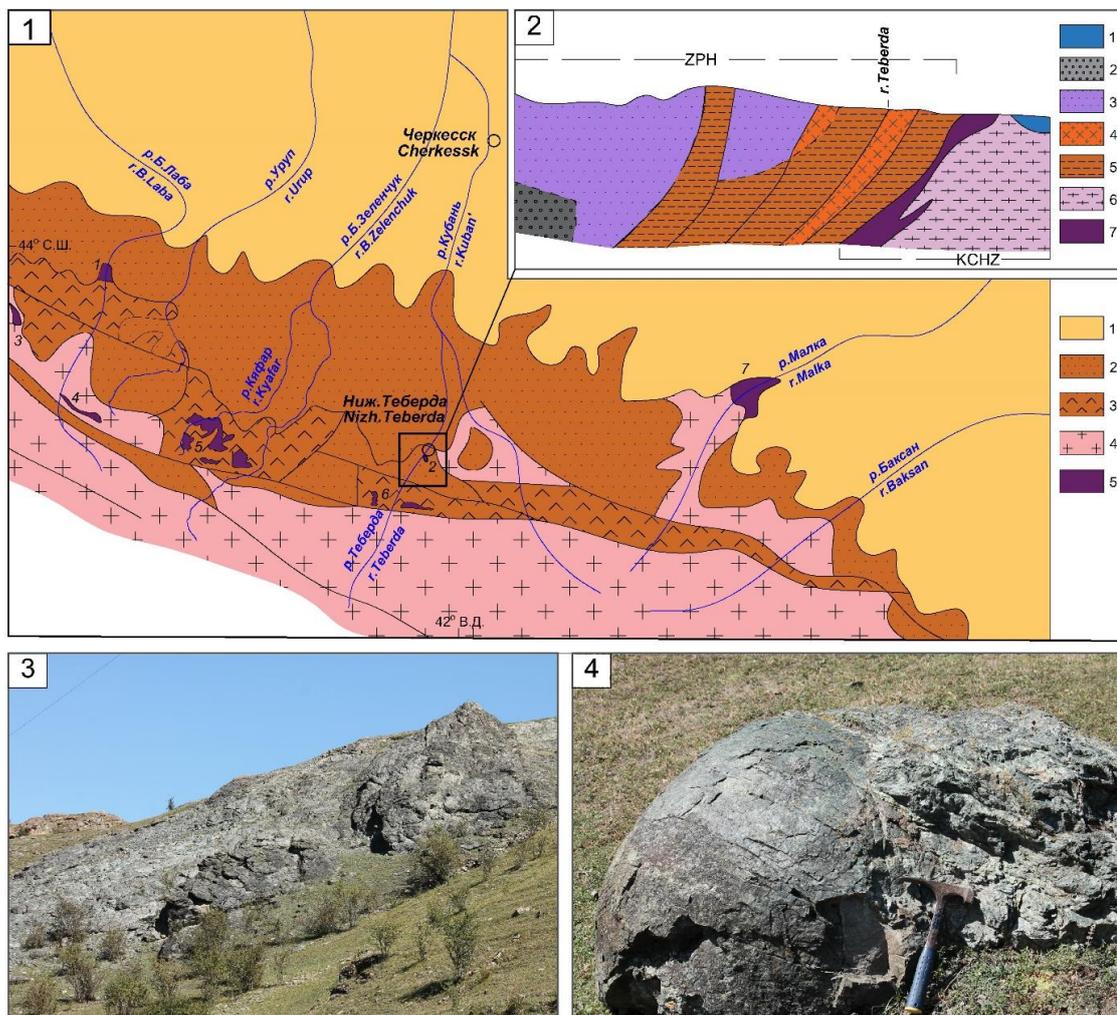


Рис. 1. Положение и геологическое строение Нижнетебердинского массива: 1 – положение территории, 2 – схематический геологический разрез (по [Омельченко, 2017]), 3 – выходы серпентинитов, 4 – «тектонический окатыш» серпентинитов.

Условные обозначения: 1-1 – нижнееловые-кайнозойские отложения; 1-2 – герцинские неоавтохтонные породы; 1-3 – герцинские покровные нижнедевонские-турнейские комплексы; 1-4 – кристаллические породы, Эльбрусской и Переваальной подзон; 1-5 – массивы гипербазитов: 1- Беденский массив; 2 – Нижнетебердинский массив, 3 – Маркопидский массив, 4 – Загеданский массив; Кяфарский комплекс: 5 – ультрабазиты хребтов Абишира-Ахуба и Эхреску (в т. ч. Кизильчукский массив) и 6 – выходы по среднему течению р. Теберда; 7 – Малкинский массив. 2-1 – ниже-среднеюрские отложения; 2-2 – верхневизейские-средне-верхнекаменноугольные сероцветные отложения; 2-3 – пермо-триасовые красноцветные грубообломочные (с вулканитами) отложения, 2-4 – гранодиориты чучкурского комплекса, 2-5 – тоханский покров: среднепалеозойские филлиты и граувакки, 2-6 – протерозойские метаморфиты Карачаево-Черкесской зоны, 2-7 – гипербазиты; ZPH – зона Передового хребта; KCHZ – Карачаево-Черкесская зона /

Fig. 1. The position and geological structure of the Nizhneteberdinsky massif: 1 – the position of the territory, 2 – schematic geological section (according to [Omelchenko, 2017]), 3 – serpentinite outcrops, 4 – fault breccia of serpentinites. Legend: 1-1 – Lower Cretaceous-Cenozoic deposits; 1-2 – Hercynian neo-autochthonous rocks; 1-3 – Hercynian cover Lower Devonian-Tournaisian complexes; 1-4 – crystalline rocks, Elbrus and Perevalnaya subzones; 1-5 – hyperbasite massifs: 1- Bedene massif; 2 – Nizhneteberdinsky massif, 3 – Markopidsky massif, 4 – Zagedansky massif; The Kyafar complex: 5 – ultrabasites of the Abishira-Akhuba and Ehrescu ridges (including the Kizilchuk massif) and 6 – exits along the middle course of the Teberda River; 7 – the Malkin massif. 2-1 – lower-Middle Jurassic deposits; 2-2 – Upper-Visean -Middle-Upper carboniferous gray-colored deposits; 2-3 – Permo-Triassic

red-colored coarse-grained (with volcanites) deposits, 2-4 – granodiorites of the Chuchkur complex, 2-5 – Tokhansky cover: Middle Paleozoic phyllites and greywacke, 2-6 – Proterozoic metamorphites of the Karachay-Cherkess zone, 2-7 – hyperbasites; ZPH – the zone of the Peredovoy Range; KCHZ – Karachay-Cherkess zone

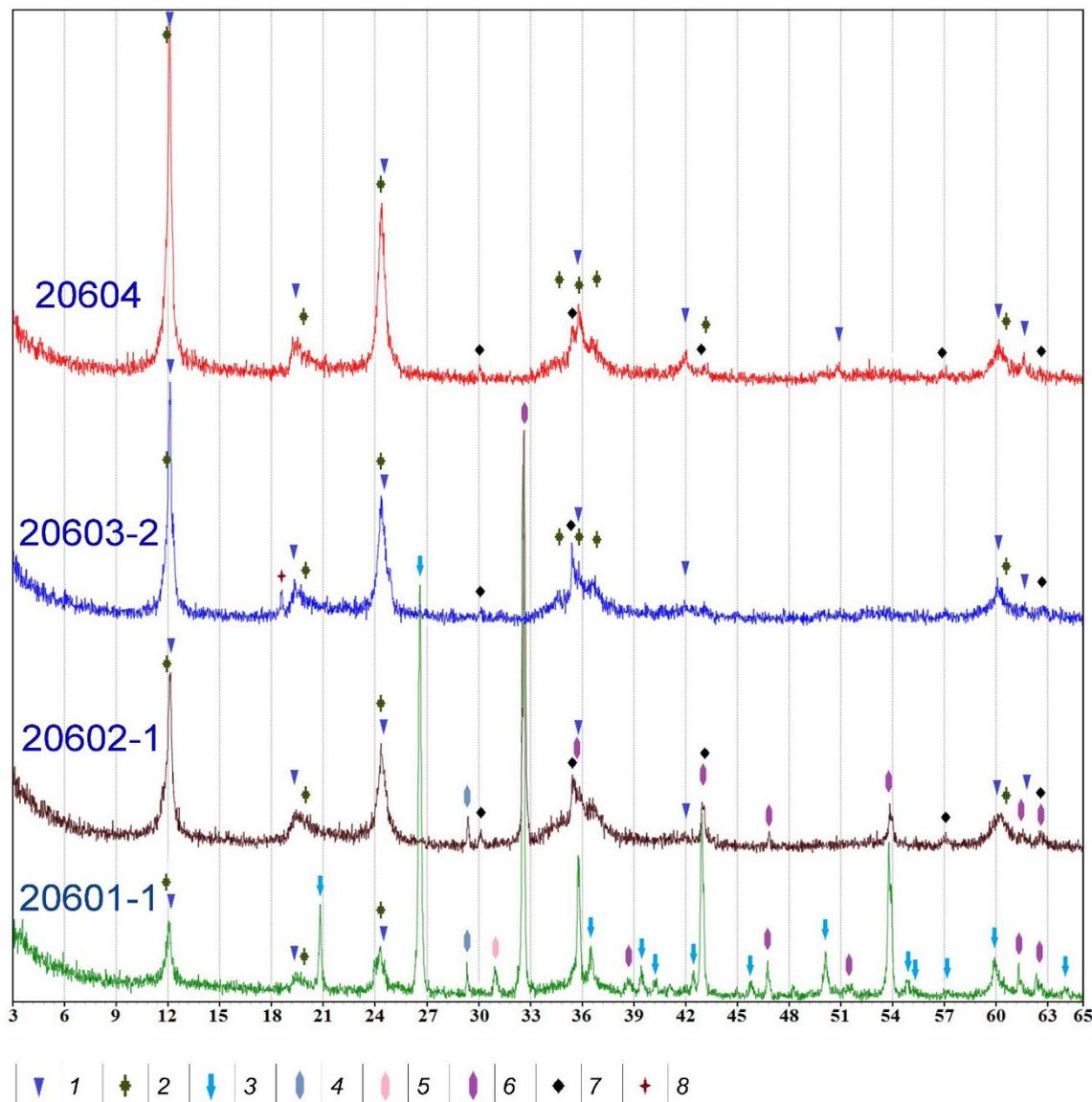


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа серпентинитов Нижнетебердинского массива.

Указаны рефлексы фаз: 1 – лизардит, 2 – хризотил, 3 – кварц, 4 – кальцит, 5 – доломит, 6 – магнезит, 7 – магнетит, 8 – брусит /

Fig. 2. Results of X-ray phase analysis of serpentinites of the Nizhneteberdinsky massif. Reflexes of phases are indicated: 1-lizardite, 2 – chrysotile, 3-quartz, 4-calcite, 5-dolomite, 6-magnesite, 7 – magnetite, 8 – brucite

et al., 1968]. Дублет DF обладает значением изомерного сдвига соответствующими ионам Fe^{3+} [Menil and Systematic, 1985]; он может соответствовать либо ионам Fe^{3+} в клинохоре и серпентине, либо ионам Fe^{3+} в высокодисперсных ферригидридах [Murad, 2010]. Исходя из того, что значения площадей компонент спектров примерно пропорциональны ионам Fe в соответствующих состояниях, долю двухвалентного железа в образце можно определить как близкую к 19%.

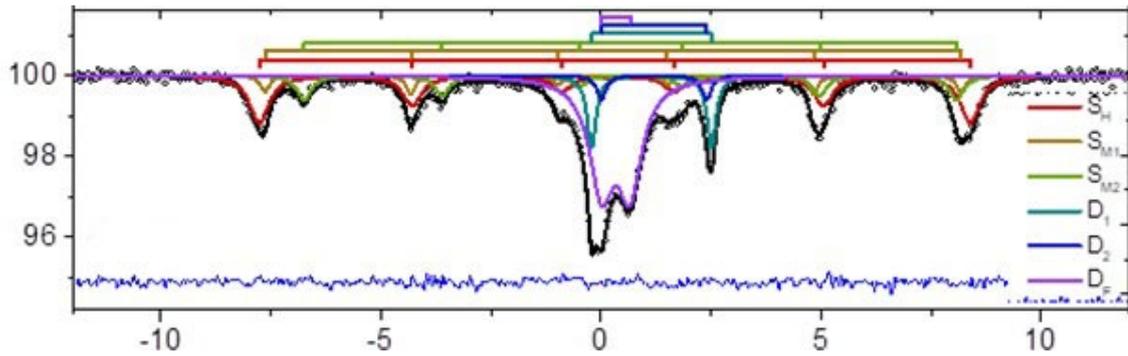


Рис. 3. Мёссбауэровский спектр серпентинита (образец № 20604) (получен при комнатной температуре) /

Fig. 3. Mössbauer spectrum of serpentinite (sample No. 20604) (obtained at room temperature)

Таблица 1 / Table 1

Параметры мёссбауэровских спектров образцов серпентинитов / Parameters of Mössbauer spectra of serpentinite samples

Образец / sample	Component	$\delta \pm 0,02$, mm/s	$\Delta/\varepsilon \pm 0,02$, mm/s	$H \pm 1$, kOe	$\Gamma \pm 0,02$, mm/s	$A \pm 1$, %	Festate	χ^2
20604	S _H	0,35	-0,04	501	0,54	28	α -Fe ₂ O ₃	1.054
	S _{M1}	0,26	0,01	490	0,24	6	Fe ₃ O ₄	
	S _{M2}	0,67	-0,01	460	0,38	12		
	D ₁	1,14	2,73		0,24	10	Fe ²⁺	
	D ₂	1,20	2,40		0,24	3	Fe ²⁺	
	D _F	0,33	0,65		0,67	41	Fe ³⁺	
	D _F	0,42	0,57		0,70	10	Fe ³⁺	
	D ₂	1,23	2,36		0,24	5	Fe ²⁺	
D _F	0,31	0,57		0,59	36	Fe ³⁺		

δ – изомерный сдвиг, ε – квадрупольный сдвиг, Δ – квадрупольное расщепление парамагнитных компонентов, H – сверхтонкое магнитное поле, Γ – ширина линии, A – площадь компонента, χ^2 – критерий Пирсона / δ – isomer shift, ε – quadrupole shift, Δ – quadrupole splitting for paramagnetic component, H – hyperfine magnetic field on ⁵⁷Fe nucleus, Γ – linewidth, A – component area, χ^2 – Pirson's criterion

Хромшпинелиды представлены зернами и агрегатами размером до 10 мм. Среди нижнетебердинских хромшпинелидов по строению и составу выделяются две группы: однородные массивные зерна, обычно окружённые магнетитовыми каймами обрастания, и зональные зерна с микропористыми оторочками. Первые характеризуются округлой формой и локализованы в микроразделах вязкопластических деформаций породы, подчеркнутых прожилками вторичного магнетита (рис. 4.6-4.8). Массивные однородные зерна имеют алюмохромитовый состав (рис. 6-1, табл. 2, анализы №№ 7-12, 14), значения $Cr\#$ составляет 0,69-0,73, $Mg\#$ 0,47-0,51. Для вторых типичны выраженная зональность, часто сложного строения (рис. 4.3-4.5),

микропористое строение многих зерен, хорошо наблюдаемое при больших увеличениях (рис. 4.4), присутствие «атолловых» структур – обрамления относительно плотных ядер микропористыми каймами (рис. 4.5). Такие зерна разбиты трещинами, заполненными серпентином и хлоритом. Тончайшее срастание хромшпинелидов с силикатными минералами отражается и в химическом составе в присутствии кремнезема (табл. 2); локальность электронно-зондового микроанализа не обеспечивает возможности измерения состава конкретной микрофазы в таких агрегатах. Некоторые зерна окружены магнетитовыми каймами, иногда сливающимися с магнетитовыми микропрожилками (рис. 4.6-4.7).

Таблица 2 / Table 2

Состав хромшпинелидов из серпентинитов Тебердинского массива (в мас.%). Места проведения микроанализов указаны на рисунке 4 / The composition of chrome spinels from serpentinites of the Teberdinsky massif (in wt.%). The microanalysis sites are indicated in Fig. 4.

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₅	MnO	FeO	ZnO	Итого	Cr#	Mg#
1	16,06	29,98	1,00	0,17	34,21	0,53	17,48	0,23	99,66	0,43	0,68
2	3,34	1,89	2,31	0,35	24,88	3,9	61,58	0,51	98,76	0,90	0,20
3	17,75	34,16	0,40	0,15	30,60	0,06	14,05	0,35	97,52	0,38	0,71
4	4,81	2,22	0,63	0,13	27,33	2,60	58,79	0,87	97,39	0,89	0,25
5	16,90	36,74	0,24	0,12	30,89	0,31	14,13	0,38	99,72	0,36	0,72
6	2,26	2,51	1,19	0,09	29,11	2,25	61,56	1,14	100,11	0,89	0,13
7	10,39	14,00		0,07	52,99	0,63	21,08	0,22	99,38	0,72	0,51
8	10,33	13,93		0,06	53,51	0,31	21,77		99,91	0,72	0,52
9	10,39	13,50			52,38	0,82	21,19	0,66	98,94	0,72	0,51
10	10,13	15,38		0,36	50,61	0,37	22,59	0,3	99,74	0,69	0,49
11	10,06	14,62		0,32	51,75	0,38	22,1	0,31	99,54	0,71	0,49
12	10,31	14,00		0,39	52,58	0,29	21,96		99,53	0,72	0,50
13	0,32		0,11		0,45	0,13	98,09		99,10	1,00	0,00
14	10,46	14,72	0,18	0,06	51,72	0,49	21,47	0,18	99,28	0,70	0,50
15	0,09		0,23		1,41	0,14	97,03	0,47	99,37	1,00	0,00

Элементное картирование выявляет присутствие в зональных зернах обогащенных алюминием и магнием ядер (рис. 5). Состав ядер соответствует хромпикотиту, их оторочек – феррихромиту – хроммагнетиту (рис. 6.1; табл. 2); в некоторых зернах прослеживается в обрамлении хромпикотита тонкая зона, отвечающая по составу ферриалюмохромиту или субалюмоферрихромиту (возможно, сложенная агрегатом мельчайших кристалликов алюмохромита и феррихромита). Для ядер значение Cr# составляет 0,36-0,43, Mg# 0,66-0,72.

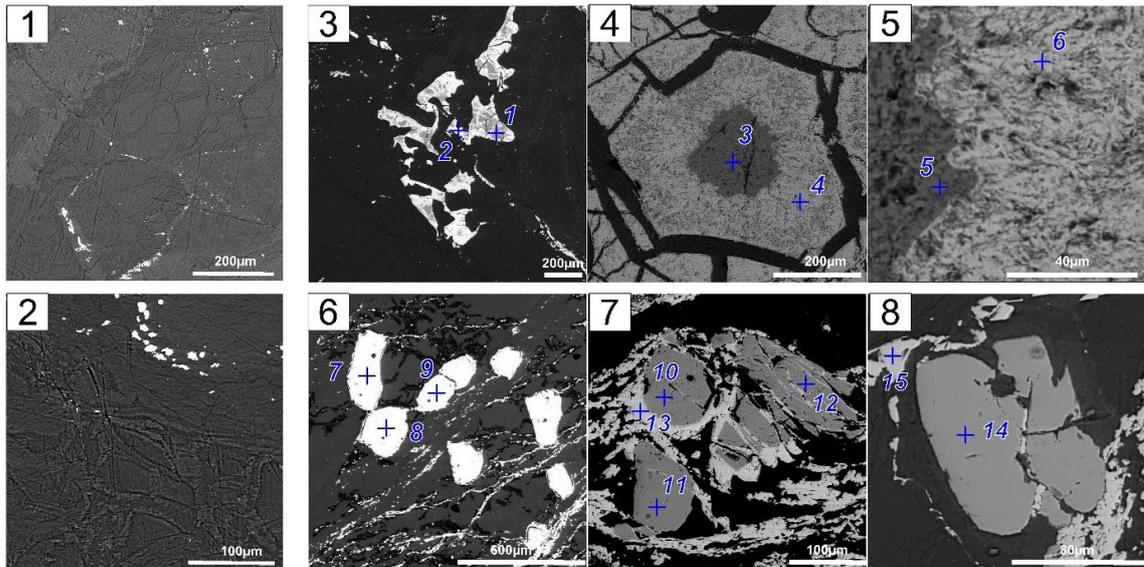


Рис. 4. Строение серпентинитов и зерен хромшпинелидов: 1, 2 – обычное микростроение серпентинитов; 3-4 – угловатые пористые зональные зерна с ядрами хромпикотита, оторочками феррихромит – хроммагнетита (локально с ферриалюмохромитом и субалюмоферрихромитом), 5 – обрамление относительно плотных ядер микропористыми каймами («атолловые» структуры); 6-8 – округлые массивные однородные зерна алюмохромитов в микрозонах вязкопластических деформаций, подчеркнутых прожилками вторичного магнетита /
 Fig. 4. Structure of serpentinites and chrome spinelides: 1, 2 – the usual microstructure of serpentinites; 3-4 – angular porous zonal grains with chrompicotite nuclei, ferrichromite – chrommagnetite rims (locally with ferrialumochromite and subalumoferrichromite), 5 – framing relatively dense nuclei with microporous borders (“atoll” structures); 6-8 – rounded massive homogeneous grains of aluminochromites in microzones of viscoplastic deformations, accentuated by veins of secondary magnetite

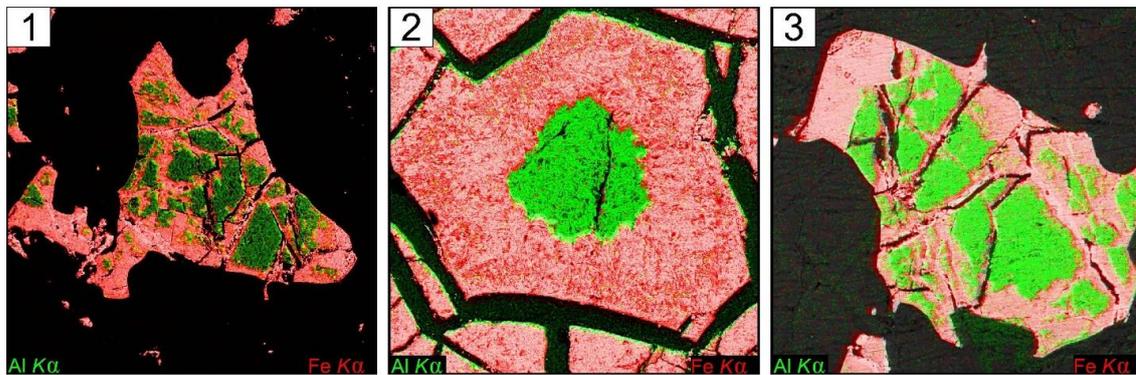


Рис. 5. Карты распределения алюминия и железа в зональных хромшпинелидах /
 Fig. 5. Distribution maps of aluminum and iron in zonal chrome spinelides

Состав ядер соответствует области составов, типичных для магматических хромшпинелидов (рис. 6-2), что позволяет использовать петрохимические критерии для реконструкции условий образования протолита.

Формирование хризотил-лизардитовой ассоциации происходило в условиях низкотемпературной (менее 300°C) зоны зеленосланцевой фации с характерным для этих условий [Evans et al., 2013] образованием лизардита за счет перекристаллизации оливина, хризотила – из гидротермального раствора. В основной массе пород в окислительной обстановке под воздействием гидротермальных растворов, на-

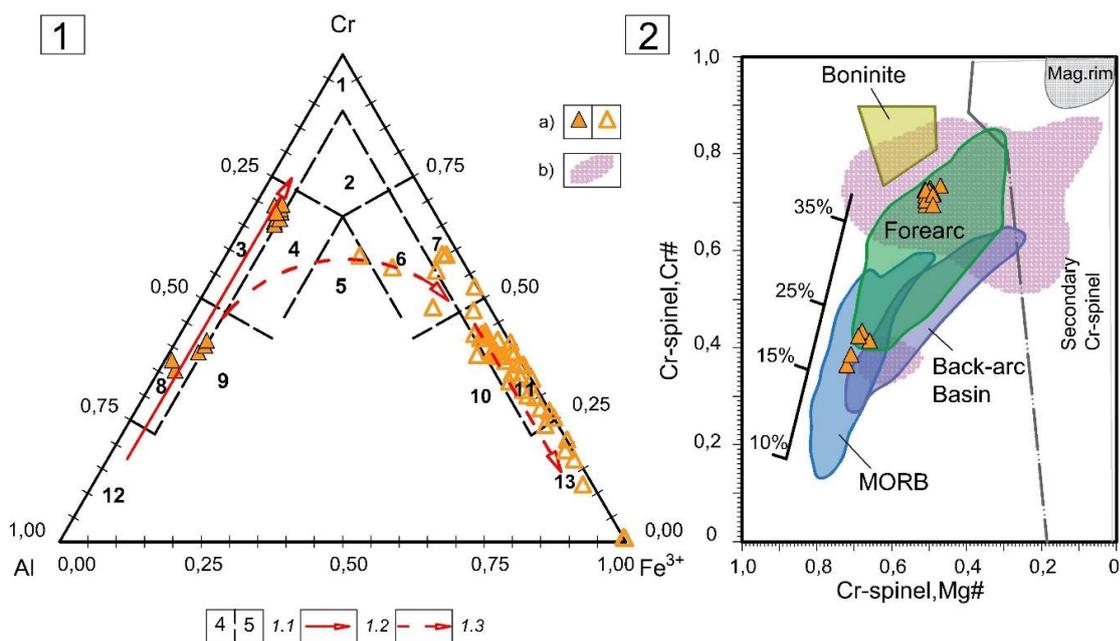


Рис. 6. Положение составов хромшпинелидов на диаграммах $Al - Cr - Fe^{3+}$ и $Cr\# - Mg\#$: 1.1 – поля составов на классификационной диаграмме (в соответствии с номенклатурой, разработанной Н. В. Павловым [Павлов, 1949]: 1 – хромиты, 2 – субферрихромиты, 3 – алюмохромиты, 4 – субферриалюмохромиты, 5 – ферриалюмохромиты, 6 – субалюмоферрихромиты, 7 – феррихромиты, 8 – хромпикотиты, 9 – субферрихромпикотиты, 10 – субалюмохроммагнетиты, 11 – хроммагнетиты, 12 – пикотиты, 13 – магнетиты); 1.2 – первичный тренд дифференциации в верхней мантии [Перевозчиков и др., 2004]; 1.3 – тренд метаморфического преобразования в коровых условиях [Перевозчиков и др., 2004]; 2 – поля составов метаморфических хромшпинелидов [Grieco, Merlini, 2012], абиссальных перидотитов COX [Dick, Bullen, 1984; Bloomer et al., 1995], островных дуг [Ishii et al., 1992; Bloomer et al., 1995; Murata et al., 2009], задуговых бассейнов [Stern, 2004], из бонинитов Марианской островной дуги [Cameron et al., 1980]. Процент плавления перидотитов мантии [Hirose, Kawamoto, 1995]. Составы хромшпинелидов: а – Нижнетебердинский массив (ядра – залитые треугольники, оторочки – пустые), б – панафриканские офиолиты Восточной пустыни Египта [Lasheen, 2021] / Fig. 6. The position of the compositions of chrome spinels on the diagrams $Al - Cr - Fe^{3+}$ and $Cr\# - Mg\#$: 1.1 – composition fields on the classification diagram (in accordance with the nomenclature developed by N. V. Pavlov [Pavlov, 1949]: 1 – chromites, 2 – subferrichromites, 3 – aluminochromites, 4 – subferrialumochromites, 5 – ferrialumochromites, 6 – subalumoferrichromites, 7 – ferrichromites, 8 – chrompicotites, 9 – subferrichrompicotites, 10 – subalumochromagnetites, 11 – chrommagnetites, 12 – picotites, 13 – magnetites); 1.2 – primary trend of differentiation in the upper mantle [Perevozchikov et al., 2004]; 1.3 – trend of metamorphic transformation in crustal conditions [Perevozchikov et al., 2004]; 2 – composition fields of metamorphic chromespinelids [Grieco, Merlini, 2012], abyssal peridotites MORB [Dick, Bullen, 1984; Bloomer et al., 1995], forearc [Ishii et al., 1992; Bloomer et al., 1995; Murata et al., 2009], back arc basins [Stern, 2004], from the boninites of the Mariana Island Arc [Cameron et al., 1980]. Melting percentage of mantle peridotites [Hirose, Kawamoto, 1995]. Chromspinelid compositions: a – Lower Aberdeen massif (cores – filled triangles, edges – empty), b – pan-African ophiolites of the Eastern Desert of Egypt [Lasheen, 2021].

сыщенных трехвалентным железом, кремнеземом и марганцем, за счет идиоморфных магматических хромшпинелей формировались зональные зёрна, сохраняющие хромпикотитовые реликтовые ядра. Присутствие характерных «атолловых» текстур с агрегатами высокопористых хромшпинелидов, обогащённых SiO_2 и MnO (табл. 2), объясняется переработкой уже зонированных (претерпевших метаморфическую

перекристаллизацию) хромшпинелидов гидротермальными растворами; образование аналогичных хромшпинелидов в сходных условиях описано в ряде массивов [Bach et al., 2006; Frost, Beard, 2007; Ahmed, Surour, 2016]. При этом развитие хроммагнетитов (а не хромитов) и образование магнетитовых каемок отражает прогрессирующее установление окислительных условий. Отсутствие брусита в большинстве образцов указывает на воздействие насыщенного кремнеземом флюида.

Более ранний этап трансформаций хромшпинелидов фиксируется присутствием полностью преобразованных в алюмохромит гомогенных зерен, образованных в процессе выноса алюминия и магния и повышения содержания двухвалентного железа и хрома. Связь высокохромистых хромшпинелидов с зонами сколово-пластических деформаций отмечена многими авторами (при этом нет однозначного взгляда на механизм их образования [Перевозчиков, 1995; Савельев, Федосеев, 2014 и др.]). Видимо, образование алюмохромитов происходило в мантийных условиях в ходе эксгумации ультрабазитов при участии флюидов (в соответствии с общим «офиолитовым» трендом (рис. 6.1)). Составы хромпикотитов «смещены» в область, тяготеющую к абиссальным перидотитам (рис. 6.2); на это указывает и величина $Cr\# < 0,6$, свойственная абиссальным зонам с генерацией толеитовых магм [Beccaluva et al., 2004; Robinson et al., 2015]. Содержание TiO_2 в них ($\sim 0,3-0,4$ мас. %) указывает на связь с перидотитами деплитированной мантии (при $TiO_2 < 0,015$ мас. % породы принадлежат к сильно деплитированной мантии [Lasheen et al., 2021 и др.]).

Выводы

Вариации состава мантийных хромшпинелидов отражают участие в строении серпентинитового меланжа Нижнетебердинского массива фрагментов апогипербазитов офиолитового комплекса, несущего следы трансформаций в ходе эксгумации (высоко- и низкоглиноземистые разновидности хромшпинелей). Впоследствии, в ходе обдукции, апогипербазиты были интенсивно переработаны гидротермальными растворами в окислительной обстановке в условиях низкотемпературной зоны зеленосланцевой фации при повышенном отношении флюид/порода, что привело к образованию характерных пористых оторочек хромшпинелидов. Наличие реликтовых хромпикотитовых ядер магматических хромшпинелей позволяет на основании петрохимических параметров относить протолит к офиолитам супра- или надсубдукционных зон (SSZ), что ранее установлено и для других относимых к беденскому комплексу серпентинитовых тел [Popov, 2021; Popov et al., 2021; Пустовит, 2021]. При этом можно предполагать принадлежность апогипербазитов к преддуговому бассейну – в пользу этого свидетельствует как ассоциация серпентинитов со среднепалеозойскими филлитами и граувакковыми породами Тоханского покрова, некоторыми авторами относимыми к комплексу преддугового бассейна [Греков, 2006], так и ряд типохимических особенностей хромшпинелидов (рис. 6.2). Аналогичная дискретная ассоциация хромшпинелидов описана в неопротерозойских офиолитах Аравийско-Нубийского щита (рис. 6.2) [Lasheen et al., 2021], отождествляемых с абиссальными перидотитами, образованными в ходе субдукции в протопреддуговой обстановке, и спреддуговыми перидотитами. Альтернативной гипотезой, требующей уточнения с учетом региональных геологических данных, является отнесение комплекса к задуговому бассейну.

Литература

1. Баранов Г.И., Белов А.А., Дотдугев И.С. Большой Кавказ. // Тектоническая расчлененность литосферы и региональные геологические исследования. – М.: Наука, 1990. – С. 196-214.
2. Греков И.И., Омельченко В.Л. Палеогеодинамика довизейского вулканизма Центрального Кавказа. // Металлогения древних и современных океанов. Формирование месторождений в разновозрастных океанических окраинах. Т. 2. – Миасс: ИМинУрО РАН, 2005. – С. 101-105.
3. Греков И.И. Среднепалеозойская Большекавказская островная дуга и вулканогенно-осадочное оруденение. // Металлогения древних и современных океанов – Миасс: ИМинУрО РАН, 2006. – С. 30-34.
4. Омельченко В.Л., Рябов Г.В., Исаев В.С. Тектоника и история развития зоны Передового хребта Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 1. – С. 40-56.
5. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов. // Тр. ин-та геол. наук АН СССР. В. 103, серия рудных месторождений. – 1949. – № 13. – С. 10-35.
6. Перевозчиков Б.В., Плотников А.В., Макиев Т.Т. Природа вариаций состава рудной и аксессуарной хромшпинели ультрабазитового массива Сыгум-Кеу (Полярный Урал). // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского. Вып. 6. – Пермь: Перм. ун-т., 2004. – С. 170-180.
7. Перевозчиков Б.В. Закономерности локализации хромитового оруденения в альпинотипных гипербазитах (на примере Урала). // Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых. Обзорная информация. В. 7. – М.: АОЗТ «Геоинформарк», 1995. – 46с.
8. Попов Ю.В., Пустовит О.Е., Никулин А.Ю. Минеральный состав серпентинитов Кишинского массива (Большой Кавказ). // Геология и Геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 38-51. DOI: 10.46698/VNC.2021.91.98.004
9. Пустовит О.Е. Типохимизм хромшпинелидов серпентинитов зоны Передового хребта Большого Кавказа. // Материалы международных Сатпаевских чтений «Сатпаевские чтения – 2021». Т. I. – Алматы: КазНИТУ имени Сатпаева, 2021. – С. 128-131.
10. Савельев Д.Е., Федосеев В.Б. Пластическое течение и реоморфическая дифференциация вещества в мантийных ультрамафитах. // Вестник Пермского университета. – 2014. – Геология, 4. – С. 22-41.
11. Снежко В.А., Снежко В.В. О возрасте апогарцбургитового Беденского комплекса. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. – 2019. – Т. IX. – С. 60-65.
12. Снежко Е.А. Петрохимические типы ультрабазитов Северного Кавказа и их структурная позиция. – М.: ВИНТИ, 1985. – 162 с.
13. Ahmed A.H., Surour A.A. Fluid-related modifications of Cr-spinel and olivine from ophiolitic peridotites by contact metamorphism of granitic intrusions in the Ablah area, Saudi Arabia. // Journal of Asian Earth Sciences. – 2016. – Vol. 122. – pp. 58-79. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.03.010
14. Bach W., Paulick H., Garrido C.J., Ildefonse B., Meurer W., Humphris S.E. Unravelling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15°N (ODP Leg 209, Site 1274). // Geophysical Research Letters. – 2006. – Vol. 25. – pp. 1467-1470
15. Ballet O., Coey J.M. D., Burke K.J. Magnetic Properties of Sheet Silicates; 2:1:1 Layer Minerals. // Physics and Chemistry of Minerals. – 1985. – Vol. 12 (6). – pp. 370-378.
16. Barnes S.J. Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. // Journal of Petrology. – 2001. – Vol. 42. – pp. 2279-2302.

17. Barnes S.J. Chromite in Komatiites: II. Modifications during greenschist to mid amphibolite facies metamorphism. // *Journal of Petrology*. – 2000. – Vol. 41. – pp. 387-409.
18. Beccaluva L., Coltore M., Giunta G., Siena F., Tethyan, S. Cordilleran ophiolites: A reappraisal of distinctive tectono-magmatic features of supra-subduction complexes in relation to subduction mode. // *Tectonophysics*. – 2004. – Vol. 393. – pp. 163-174.
19. Bloomer S.H., Taylor B., MacLeod C. J., Stern R.J., Fryer P., Hawkins J.W., Johnson L. Early Arc Volcanism and the Ophiolite Problem: A Perspective from Drilling in the Western Pacific. // *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*. American Geophysical Union, Washington, DC. – 1995. – pp. 1-30.
20. Borggaard O.K., Lindgreen H.B., Mørup S., Oxidation and Reduction of Structural Iron in Chlorite at 480°C. // *Clays and Clay Miner.* – 1982. – Vol. 30. – pp. 353-364.
21. Cameron W.E., Nisbet E. G., Dietrich V.J. Petrographic dissimilarities between ophiolitic and ocean-floor basalts. // *Ophiolites, Proceedings International Ophiolite Symposium, Cyprus, 1979. The geological survey of Cyprus, Nicosia*. – 1980. – pp 182-193
22. Dick H.J. B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1984. – Vol. 86 (1). – pp. 54-76. DOI: 10.1007/BF00373711
23. Evans B. W., Hattori K., Baronnet A. Serpentinite: What, why, where? // *Elements*. – 2013. – Vol. 9. – pp. 99-106.
24. Frost B.R., Beard S. On Silica Activity and Serpentinization. // *Journal of Petrology*. – 2007. – Vol. 48 (7). – pp. 1351-1368.
25. Grieco G., Merlini A. Chromite alteration processes within Vourinos ophiolite. // *International Journal of Earth Sciences*. – 2012. – Vol. 101 (6). – pp. 1523-1533.
26. Hirose K., Kawamoto T. Hydrous partial melting of lherzolite at 1 Gpa: the effect of H₂O on the genesis of basaltic magmas. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1995. – Vol. 133. – pp 463-473.
27. Irvine T.N. Chromian Spinel As a Petrogenetic Indicator, Part 2 Petrologic Applications. // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1967. – Vol. 4. – pp. 71-103
28. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator; Part 1, Theory. // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1965. – Vol. 2. – pp. 648-671.
29. Ishii T., Robinson P.T., Maekawa H., Fiske R. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu – Ogasawara – Mariana fore-arc, Leg125. // *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results: Ocean Drilling Program; Ocean Drilling Program: College Station, TX, USA*. – 1992. – Vol. 125. – pp. 445-485.
30. Küdning W., Bömmel H. Some Properties of Supported Small α -Fe₂O₃ Particles Determined with the Mossbauer Effect. // *Physical Review*. – 1966. – Vol. 142. No. 2. – pp. 327-333.
31. Lasheen E. S. R., Saleh G. M., Khaleal F. M., Alwetaishi M. Petrogenesis of Neoproterozoic Ultramafic Rocks, Wadi Ibib – Wadi Shani, South Eastern Desert, Egypt: Constraints from Whole Rock and Mineral Chemistry. // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11 (22). – p. 10524.
32. Leblanc M., Nicolas A. Ophiolitic chromitites. // *Int. Geol. Rev.* – 1992. – Vol. 34. – pp. 653-686.
33. Malysheva T. V., Vdovykin G. P., Grachev V.I. Study of the Forms of Iron in Carbonaceous Meteorites by the Mossbauer Effect. II. Formation Conditions of the Iron Phases in the Water-containing Meteorites Orgueil, Murray, and Migei. // *Geochemistry International*. – 1976. – Vol. 13 (6). – pp. 188-193.
34. Matsnev M.E., Rusakov V.S. SpectrRelax: An Application for Mössbauer Spectra Modeling and Fitting. // *AIP Conference Proceedings*. – 2012. – Vol. 1489. – pp. 178-185.
35. Menil F., Systematic Trends of the ⁵⁷Fe Mossbauer Isomer Shifts in (FeO_n) and (FeF_n) Polyhedra. // *Journal of Physics and Chemistry of Solids* – 1985. – Vol. 46 (7). – pp. 763-789.
36. Murad E., Mössbauer spectroscopy of clays, soils and their mineral constituents. // *Clay Minerals*. – 2010. – Vol. 45. – pp. 413-430

37. Murata K., Maekawa H., Yokose H., Yamamoto K., Fujioka K., Ishii T., Chiba H., Wada Y. Significance of serpentinization of wedge mantle peridotites beneath Mariana forearc, western Pacific. // *Geosphere*. Geological Society of America. – 2009. – Vol. 5 (2). – pp. 90-104.
38. Parkinson I.J., Pearce J.A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. // *Journal of Petrology*. – 1998. – Vol. 39 (9). – pp. 1577-1618.
39. Popov Y.V. Zonal Cr-spinels from Serpentinites in North Western Part of the Greater Caucasus. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 720 (1). No. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012036
40. Robinson P.T., Trumbull R.B., Schmitt A., Yang J.S., Li J.W., Zhou M.F., Xiong F. The origin and significance of crustal minerals in ophiolitic chromitites and peridotites. // *Gondwana Research*. – 2015. – Vol. 27. – pp. 486-506.
41. Rozenson I., Bauminger E.R., Heller-Kallai L. Mossbauer Spectra of Iron in 1:1 phyllosilicates. // *American Mineralogist* – 1979. – Vol. 64. – pp. 893-901.
42. Stern R.J., Johanson P.R., Kröner A., Yibas B. Neoproterozoic ophiolites of the Arabian-Nubian Shield. // *Precambrian ophiolites and related rocks*. In *Developments in Precambrian Geology*; Kusky, T.M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands. – 2004. – Vol. 13. – pp. 95-128.
43. Taylor G.L., Ruotsala A.P. and Keeling Jr.R. O. Analysis Of Iron In Layer Silicates By Mossbauer Spectroscopy. // *Clays and Clay Minerals*. – 1968. – Vol. 16. – pp. 381-391
44. Van Der Woud F. Mössbauer Effect in α -Fe₂O₃. // *Physica Status Solidi*. – 1966. – Vol. 17. – pp. 417-432.

References

1. Baranov G.I., Belov A.A., Dotduev I.S. Greater Caucasus. Tectonic stratification of the lithosphere and regional geological studies. Moscow. Nauka, 1990. pp. 196-214. (In Russ.)
2. Grekov I.I., Omel'chenko V.L. Paleogeodynamics of the Pre-Visean volcanism of the Central Caucasus. Metallogeny of ancient and modern oceans. Formation of deposits in oceanic margins of different ages. Miass. IMinUrO RAN, 2005. pp. 101-105. (In Russ.)
3. Grekov I.I. Middle Paleozoic Bolshekavkazskaya island arc and volcanogenic-sedimentary mineralization. Metallogeny of ancient and modern oceans. Miass. IMinUrO RAN, 2006. pp. 30-34. (In Russ.)
4. Omelchenko V.L., Ryabov G.V., Isaev V.S. Tectonics and history of the development of the zone of the Front ridge of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 1. pp. 40-56. (In Russ.)
5. Pavlov N.V. Chemical composition of chrome spinelides in connection with the petrographic composition of ultrabasic intrusive rocks. *Tr. In-ta-geol. Nauk AN SSSR*. 1949. Vol. 13. pp. 10-35. (In Russ.)
6. Perevozchikov B.V., Plotnikov A.V., Makiev T.T. Nature of Composition Variations in Ore and Accessory Cr-Spinel of the Syum-Keu Ultramafic Massif (Polar Urals). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii: nauch. CHteniyapamyati P. N. CHirvinskogo*. 2004. Vol. 6. pp. 170-180. (In Russ.)
7. Perevozchikov B.V. Regularities of localization of chromite ore in the alpinotype ultrabasic rocks. *Geoinformmark* – 1995. 46p. (In Russ.)
8. Popov Yu.V., Pustovit O.E., Nikulin A.Yu. Mineral composition of serpentinites of the Kishinskij protrusion (Greater Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South* (In Russ.). 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 38-51. DOI: 10.46698/VNC.2021.91.98.004 (In Russ.)
9. Pustovit O.E. Typochemistry of chromespinelids of serpentinites of the zone of the Front Range of the Greater Caucasus. *Materialy mezhdunarodnyh Satpaevskih chtenij «Satpaevskie chteniya – 2021»*. Almaty. KazNITU imeni Satpaeva, 2021. Vol. I. pp. 128-131. (In Russ.)
10. Savel'ev D. E., Fedoseev V.B. Plastic flow and rheomorphic differentiation of matter in mantle ultramafics. *Vestnik Permskogo universiteta*. 2014. No. 4. pp. 22-41. (In Russ.)

11. Snezhko V.A., Snezhko V.V. Modern problems of Geology, Geophysics and Geoecology of the North Caucasus. Collective monograph based on the materials of the IX all-Russian scientific and technical conference. 2019. pp. 60-65. (In Russ.)
12. Snezhko E.A. Petrochemical types of ultrabasites of the North Caucasus and their structural position. Moscow. VINITI, 1985. p. 162. (In Russ.)
13. Ahmed A.H., Surour A.A. Fluid-related modifications of Cr-spinel and olivine from ophiolitic peridotites by contact metamorphism of granitic intrusions in the Ablah area, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. Vol. 122. pp. 58-79. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.03.010
14. Bach W., Paulick H., Garrido C.J., Ildefonse B., Meurer W., Humphris S.E. Unravelling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15°N (ODP Leg 209, Site 1274). *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 25. pp. 1467-1470
15. Ballet O., Coey J.M. D., Burke K.J. Magnetic Properties of Sheet Silicates; 2:1:1 Layer Minerals. *Physics and Chemistry of Minerals*. 1985. Vol. 12 (6). pp. 370-378.
16. Barnes S.J. Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 42. pp. 2279-2302.
17. Barnes S.J. Chromite in Komatiites: II. Modifications during greenschist to mid amphibolite facies metamorphism. *Journal of Petrology*. 2000. Vol. 41. pp. 387-409.
18. Beccaluva L., Coltori M., Giunta G., Siena F., Tethyan, S. Cordilleran ophiolites: A reappraisal of distinctive tectono-magmatic features of supra-subduction complexes in relation to subduction mode. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 393. pp. 163-174.
19. Bloomer S.H., Taylor B., MacLeod C. J., Stern R.J., Fryer P., Hawkins J.W., Johnson L. Early Arc Volcanism and the Ophiolite Problem: A Perspective from Drilling in the Western Pacific. *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*. American Geophysical Union, Washington, DC. 1995. pp. 1-30.
20. Borggaard O.K., Lindgreen H. B., Mørup S., Oxidation and Reduction of Structural Iron in Chlorite at 480°C. *Clays and Clay Miner.* 1982. Vol. 30. pp. 353-364.
21. Cameron W.E., Nisbet E.G., Dietrich V.J. Petrographic dissimilarities between ophiolitic and ocean-floor basalts. *Ophiolites, Proceedings International Ophiolite Symposium, Cyprus, 1979. The geological survey of Cyprus, Nicosia*. 1980. pp. 182-193
22. Dick H. J. B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol. 86 (1). pp. 54-76. DOI: 10.1007/BF00373711
23. Evans B. W., Hattori K., Baronnet A. Serpentine: What, why, where? *Elements*. 2013. Vol. 9. pp. 99-106.
24. Frost B.R., Beard S. On Silica Activity and Serpentinization. *Journal of Petrology*. 2007. Vol. 48 (7). pp. 1351-1368.
25. Grieco G., Merlini A. Chromite alteration processes within Vourinos ophiolite. *International Journal of Earth Sciences*. 2012. Vol. 101 (6). pp. 1523-1533.
26. Hirose K., Kawamoto T. Hydrous partial melting of lherzolite at 1 Gpa: the effect of H₂O on the genesis of basaltic magmas. *Earth and Planetary Science Letters*. 1995. Vol. 133. pp 463-473.
27. Irvine T.N. Chromian Spinel As a Petrogenetic Indicator, Part 2 Petrologic Applications. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1967. Vol. 4. pp. 71-103.
28. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator; Part 1, Theory. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1965. Vol. 2. pp. 648-671.
29. Ishii T., Robinson P.T., Maekawa H., Fiske R. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu – Ogasawara – Mariana fore-arc, Leg125. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results: Ocean Drilling Program; Ocean Drilling Program: College Station, TX, USA*. 1992. Vol. 125. pp. 445-485.

30. Küdning W., Bömmel H. Some Properties of Supported Small α -Fe²O₃ Particles Determined with the Mossbauer Effect. *Physical Review*. 1966. Vol. 142. No. 2. pp. 327-333.
31. Lasheen E. S. R., Saleh G. M., Khaleal F. M., Alwetaishi M. Petrogenesis of Neoproterozoic Ultramafic Rocks, Wadi Ibib – Wadi Shani, South Eastern Desert, Egypt: Constraints from Whole Rock and Mineral Chemistry. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11 (22). p. 10524.
32. Leblanc M., Nicolas A. Ophiolitic chromitites. *Int. Geol. Rev.* 1992. Vol. 34. pp. 653-686.
33. Malysheva T. V., Vdovykin G. P., Grachev V. I. Study of the Forms of Iron in Carbonaceous Meteorites by the Mossbauer Effect. II. Formation Conditions of the Iron Phases in the Water-containing Meteorites Orgueil, Murray, and Migei. *Geochemistry International*. 1976. Vol. 13 (6). pp. 188-193.
34. Matsnev M. E., Rusakov V. S. SpectrRelax: An Application for Mössbauer Spectra Modeling and Fitting. *AIP Conference Proceedings*. 2012. Vol. 1489. pp. 178-185.
35. Menil F., Systematic Trends of the ⁵⁷Fe Mossbauer Isomer Shifts in (FeO_n) and (FeF_n) Polyhedra. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1985. Vol. 46 (7). pp. 763-789.
36. Murad E., Mössbauer spectroscopy of clays, soils and their mineral constituents. *Clay Minerals*. 2010. Vol. 45. pp. 413-430
37. Murata K., Maekawa H., Yokose H., Yamamoto K., Fujioka K., Ishii T., Chiba H., Wada Y. Significance of serpentinization of wedge mantle peridotites beneath Mariana forearc, western Pacific. *Geosphere*. Geological Society of America. 2009. Vol. 5 (2). pp. 90-104.
38. Parkinson I. J., Pearce J. A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. *Journal of Petrology*. 1998. Vol. 39 (9). pp. 1577-1618.
39. Popov Y. V. Zonal Cr-spinels from Serpentinites in North Western Part of the Greater Caucasus. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 720 (1). No. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012036
40. Robinson P. T., Trumbull R. B., Schmitt A., Yang J. S., Li J. W., Zhou M. F., Xiong F. The origin and significance of crustal minerals in ophiolitic chromitites and peridotites. *Gondwana Research*. 2015. Vol. 27. pp. 486-506.
41. Rozenson I., Bauminger E. R., Heller-Kallai L. Mossbauer Spectra of Iron in 1:1 phyllosilicates. *American Mineralogist*. 1979. Vol. 64. pp. 893-901.
42. Stern R. J., Johanson P. R., Kröner A., Yibas B. Neoproterozoic ophiolites of the Arabian-Nubian Shield. *Precambrian ophiolites and related rocks*. In *Developments in Precambrian Geology*; Kusky, T. M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands. 2004. Vol. 13. pp. 95-128.
43. Taylor G. L., Ruotsala A. P., Keeling Jr. R. O. Analysis of Iron In Layer Silicates By Mossbauer Spectroscopy. *Clays and Clay Minerals*. 1968. Vol. 16. pp. 381-391.
44. Van Der Woud F. Mössbauer Effect in α -Fe₂O₃. *Physica Status Solidi*. 1966. Vol. 17. pp. 417-432.

УДК 624.042.7

DOI: [10.46698/VNC.2022.47.47.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.47.47.003)

Оригинальная статья

Характеристики сейсмического движения дневной поверхности. Их использование в сейсмостойком строительстве

Х. Х. Курбанов¹, Лин Хонг², Г. В. Сорокина³, А. М. Уздин³

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, 100025, г. Ташкент, Мирабатский район, ул. Одилходжаева, д. 1;

²Китайский нефтяной университет, Китай, 266580, г. Циндао, пр. Чанцзянсилу, д. 66;

³Петербургский государственный университет путей сообщения, Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: oofy@yandex. ru

Статья поступила: 02.07.2022, доработана: 08.08.2022, одобрена в печать: 17.08.2022

Резюме: Актуальность работы. В статье анализируются требования к расчетному сейсмическому воздействию. Прежде всего, это обеспечение запаса прочности сооружения при рассмотрении его предельных состояний. С этой точки зрения понятие схожести реального и расчетного воздействия весьма условны. По крайней мере, внешнего сходства реального и расчетного воздействия не требуется. Вместе с тем расчетное воздействие должно иметь ряд характеристик близких к реальным. **Цель работы.** В статье анализируются три группы характеристик: кинематические, энергетические и спектральные. Из кинематических характеристик детально проанализированы пиковые ускорения и коэффициент гармоничности. Установлена связь этих характеристик с преобладающим периодом воздействия на акселерограмме. Предложена новая модификация коэффициента гармоничности с учетом остаточных смещений после землетрясения. **Методы работы.** Для оценки пиковых ускорений предложена методика, основанная на шкале балльности и не требующая привлечения других нормативных документов и карт ОСР. **Результаты работы.** Отмечено, что кинематические характеристики являются основными для проведения силовых расчетов на действие проектного землетрясения. В качестве энергетических характеристик рассмотрены интенсивность по Ариасу, абсолютная кумулятивная скорость, плотность сейсмической энергии, среднеквадратичные ускорения и показатель Парка-Янга. Показано, что энергетические характеристики в рамках одного балла постоянны и не зависят от спектрального состава воздействия. Получены доверительные границы для оценки интенсивности по Ариасу и абсолютной кумулятивной скорости. Отмечено, что энергетические характеристики являются определяющими для расчетов конструкций за пределами упругости на действие максимального расчетного землетрясения. При анализе спектральных характеристик помимо традиционных спектров отклика рассмотрены спектр работы сил пластического деформирования и предложенный авторами спектр повреждаемости сооружения. Первый спектр важен для расчета упругопластических систем, а второй – для расчета адаптивных систем. При моделировании спектрального состава воздействия авторы считают необходимым исходить из использования резонансных для сооружения расчетных воздействий. Уход от этого принципа должен иметь веское обоснование сейсмологов, которые, наряду с инженерами-проектировщиками должны нести за это финансовую и юридическую ответственность.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, моделирование, отрезок синусоиды, акселерограмма, продолжительность, энергетические критерии.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту ГФЕН-а 21-58-53012 «Теоретические основы и методы проектирования сценариев накопления повреждений при сейсмических воздействиях на примере портовых и шельфовых сооружений» и по гранту национального фонда естественных наук КНР №52111530036 «Study on the evolution of seismic damage scenarios and limit state of offshore platforms». Авторы выражают благодарность А.А. Долгой и С.В. Прокоповичу за помощь в работе.

Для цитирования: Курбанов Х. Х., Лин Хонг, Сорокина Г. В., Уздин А. М. Характеристики сейсмического движения дневной поверхности. Их использование в сейсмостойком строительстве. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 34-60. DOI: 10.46698/VNC. 2022.47.47.003.

GEOPHYSICS

[DOI: 10.46698/VNC. 2022.47.47.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.47.47.003)

Original paper

Characteristics of the seismic movement of the day surface. Their use in earthquake engineering

Kh. Kh. Kurbanov¹, Lin Hong², G. V. Sorokina³, A. M. Uzdin³

¹Toshkent Davlat Transport Universitet, 1 Odikhodzhaev street, Tashkent 100025, Uzbekistan;

²China University of Petroleum, 66 West Changjiang Road, Huangdao District, Qindao 266580, China;

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint-Petersburg 190031, Russian Federation, e-mail: oofy@yandex. ru

Received: 02.08.2022, revised: 08.08.2022, accepted: 17.08.2022

Abstract: Relevance. The paper analyzes requirements for the design seismic input. First of all, it is ensuring the structure safety margin when considering its limiting states. From this point of view, the concept of similarity between real and design actions is rather indefinite. At least, no external similarity between the real and the design actions is required. At the same time, the design action should have a number of characteristics close to real ones. **Aim.** The paper analyzes three groups of such characteristics: kinematic, energy and spectral ones. Out of the kinematic characteristics, the peak accelerations and the harmonic coefficient are analyzed in detail. The relationship of these characteristics with the input predominant period on the accelerogram has been established. A new modification of the harmonic coefficient is proposed, taking into account the residual displacements after the earthquake. **Methods.** To assess peak accelerations, the authors proposed a method based on a scale of earthquake intensity, which does not require the use of other regulatory documents and seismic zoning maps. **Results.** It is noted that the kinematic characteristics are the main ones for carrying out force calculations of structures under the action of a design earthquake. The Arias intensity, absolute cumulative velocity, seismic energy density, root-mean-square acceleration and Park-Young indicator are considered as energy characteristics. It is shown that the energy characteristics in the frame of the same seismic intensity are constant and do not depend on the action spectral composition. Confidence limits for the Arias intensity and absolute cumulative velocity estimates were obtained. It is noted that the energy characteristics are important for calculations of structures out of elasticity area under maximum design earthquake. When considering the spectra, besides the response spectra, the spectrum of the work of plastic deformation forces and the spectrum of structure damageability are considered. The former spectrum is important for calculating elastoplastic systems, and the latter one is important for calculating adaptive systems. When modeling the action spectral composition, it is necessary to use resonant design input for the calculated structure. A contravention of this requirement must have a strong rationale for seismologists, who must bear financial and legal responsibility for this solution.

Key words: seismic action, modeling, sinusoidal segment, accelerations, duration, energy criteria.

Acknowledgment: *The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under the SFNS-a grant 21-58-53012 "Theoretical foundations and methods for designing the scenarios of damage accumulation*

under seismic effects on the example of port and offshore structures” and under the grant of the National Natural Science Foundation of China No. 52111530036 “Study on the evolution of seismic damage scenarios and limit state of offshore platforms”. The authors express their gratitude to A. A. Dolgoy and S. V. Prokopovich for their help in the work.

For citation: Kurbanov Kh. Kh., Lin Hong, Sorokina G. V., Uzdin A. M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 34-60. DOI: 10.46698/VNC. 2022.47.47.003.

Введение

В настоящее время в инженерной практике все большее распространение получает расчет сооружений по акселерограммам землетрясений. В большинстве случаев он дополняет нормативный расчет по спектральной методике, но для многих современных конструкций с нелинейной диаграммой деформирования он является необходимым. Также необходим расчет сооружения по акселерограммам для обоснования сейсмостойкости новых технических решений, для которых нормативная система расчетных коэффициентов не апробирована на опыте прошлых землетрясений. К сожалению, проблема задания расчетных акселерограмм не регламентируется пока в нормативной базе, что создает проблемы при проектировании и порождает различные, иногда противоречивые подходы к заданию расчетного воздействия. В настоящее время вопросы генерации расчетных акселерограмм, как правило, решают сейсмологи. При этом они, как правило, не учитывают требования, необходимые инженеру для обеспечения безопасности сооружения. Эти требования анализируются в настоящей статье.

Основные принципы задания расчетного воздействия при расчете сооружений

Как отмечено выше, в сейсмостойком строительстве отсутствуют пока единые принципы генерации расчетных воздействий. Этот вопрос широко обсуждался в литературе [Бугаев, 1982; Вахрина, 2013; Гузеев, 2009; Давыдова и др., 2011; Ильина, Смирнова и др., 2019; Uzdin, Prokopovich, 2020; и др.], однако обсуждение не привело пока к желаемому результату. Для задания воздействия используются два, на первый взгляд противоречивых подхода.

Первый, опять же на первый взгляд естественный подход исходит из требования специалистов-сейсмологов. Расчетное воздействие должно быть максимально похожим на возможное реальное воздействие для рассматриваемой площадки строительства.

Это положение кажется очевидным чиновнику и обывателю и, поэтому, может быть весьма опасно при проектировании, о чем неоднократно говорилось в литературе [Ильина, Уздин, 2017; Uzdin, Prokopovich, 2020].

Для реализации первого подхода сейсмологами проводится большая работа. Прежде всего, оценивается сейсмическая опасность площадки строительства, далее выявляются возможные очаги землетрясений, анализируются прошлые землетрясения с похожими сейсмогеологическими условиями, проводятся расчеты распространения волн от очагов к площадке строительства и т. д. Все эти работы крайне трудоемки, дорогостоящи и требуют длительного времени для выполнения. Это позволяет использовать их только при проектировании больших и ответственных объектов. Массовое же строительство лишено таких возможностей. Кроме того,

сказывается сложившееся недоверие инженеров к сейсмологам: из 27 разрушительных землетрясений, имевших место на территории бывшего СССР, 24 произошли в районах, которые считались не сейсмичными или слабо сейсмичными [Савинов, 1978; Уздин и др., 2012]. Поэтому у инженеров сложился другой подход к моделированию воздействий. Он четко сформулирован еще в 1923 г. нашим выдающимся ученым Н. М. Герсевановым [Долгая и др., 2020] и детально описан в известной монографии В. И. Сливкера и А. В. Перельмутера [Перельмутер, Сливкер, 2002]. В силу его важности, а также в силу того, что многие молодые инженеры его не знают, мы повторим 4 основных принципа этого подхода:

1. Расчетное воздействие должно быть для сооружения более опасным, чем реальное. Иными совами, оно должно обеспечивать определенный запас прочности.
2. Расчетное воздействие должно исходить из анализируемого предельного состояния конструкции.
3. Расчетное воздействие не должно приводить к излишнему удорожанию сооружения.
4. Расчетное воздействие должно давать возможность проведения расчетного анализа поведения сооружения.

Должно ли расчетное воздействие быть внешне похожим на реальное? Абсолютно нет!

Отметим также важнейшее положение, следующее из сформулированных принципов. У конструкции всегда рассматривается несколько предельных состояний: трещины в стенах, обрушение колонн, сдвиг по основанию и т. п. Следовательно, для расчета конструкции должны использоваться несколько различных моделей расчетного воздействия. Это особенно актуально с переходом к многоуровневому проектированию [Dowric, 1977; Micov, Petrovski, 2000; Park, Paulay, 1975; и др.].

Кажется, что второй подход полностью исключает первый, а работа сейсмологов вполне бесполезна проектировщику и, во многих случаях, может нанести большой вред. Например, генерируется некоторое расчетное воздействие для 9-бтиального района. Естественно, представляется 9-тибальное воздействие и оно, по данным сейсмологов – высокочастотное. Проектировщик проектирует сейсмоизолированное сооружение, и заданное воздействие оказывается совершенно безопасным. Однако в регионе возможны относительно слабые воздействия силой 6-7 баллов, резонансные для сейсмоизолированного объекта. Они то и разрушат сооружение. Другой пример – слабодемпфированные сооружения очень чувствительны к резонансу и отклонение преобладающей частоты воздействия на 5% может изменить усилия в элементах конструкции в 3-4 раза. Сейсмологи же не могут задать частоту расчетного воздействия с такой точностью.

Однако можно исключить возникающее противоречие подходов. Все дело в термине «максимально похожий». Два воздействия можно считать похожими, если они обладают одинаковыми свойствами по отношению к объекту, на который они действуют. Поэтому центральным вопросом для оценки похожести является выделение и анализ основных свойств сейсмического воздействия, которые важны для проектировщика.

Методы работы

Методы исследования связаны с основными свойствами сейсмического воздействия. Для описания сейсмического воздействия используют различные характе-

ристики. Их можно подразделить на три большие группы: кинематические, спектральные и энергетические.

Кинематические характеристики сейсмического воздействия

К числу основных кинематических характеристик сейсмического воздействия относятся:

- пиковые ускорения, скорости и смещения (PGA, peak ground accelerations, PGV, PGD);
- остаточные смещения;
- коэффициент гармоничности k , определяемый по формуле:

$$K = \frac{y_0^{(\max)} \cdot \dot{y}_0^{(\max)}}{(\ddot{y}_0^{(\max)})^2}, \quad (1)$$

где $y_0^{(\max)}$ – максимальные пиковые смещения; $\dot{y}_0^{(\max)}$ – максимальные пиковые скорости; $\ddot{y}_0^{(\max)}$ – максимальные пиковые ускорения.

До настоящего времени кинематические характеристики, прежде всего величина PGA, считаются у инженеров и сейсмологов основными. Величина PGA нормируется как в ГОСТ (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности), так и в СП (СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах»). Правда значения ГОСТ и СП не совпадают. За 100 лет развития инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства величина PGA возросла для 9-тибалльных воздействий с 1 м/с^2 до 7 м/с^2 . Попытки увязать эту величину с макросейсмическими баллами оказались неудачными. В Европейской шкале балльности по этой причине вовсе отсутствует инструментальная часть. Этот результат представляется вполне естественным. Дело в том, что не может быть корреляции между PGA и макросейсмическим баллом. Этот вопрос широко обсуждался в литературе. Когда автомобиль проходит по мостику, на нем подпрыгивают камешки. Это значит, что их ускорение больше ускорения силы тяжести g . Однако никому в голову не придет говорить, что автомобиль создает на мосту 10-тибалльное зем-

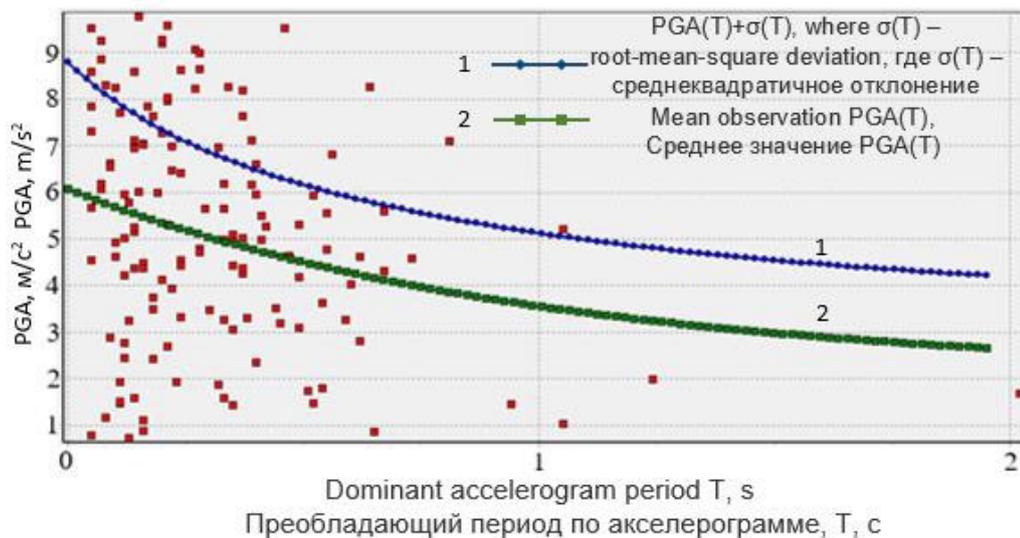


Рис. 1. Зависимость PGA от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-балльных землетрясений /

Fig. 1. Dependence of PGA on the action prevailing period T according to the processing data of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

летрясение. Нам представляется, что Ф. Ф. Аптикаев решил проблему инструментальной части шкалы балльности, приведя значения PGA в диапазоне периодов 0,3-0,5 с [Айзенберг, 1981]. Однако далее следует учитывать, что PGA существенно зависят от преобладающего периода воздействия. Этот факт отмечен еще в исследованиях О. А. Савинова при оценке сейсмостойкости сейсмоизолированных систем и отражен в публикациях его учеников [Долгая, 1994; Уздин и др., 2012; и др.]. В частности, А. А. Долгой на основе обработки около 200 записей 8-мибалльных землетрясений получена зависимость PGA (T), где T – преобладающий период на акселерограмме [Долгая, 1994]. Авторами получены аналогичные результаты при обработке 140 записей 9-тибалльных землетрясений. База записей собрана в процессе совместной работы китайских и российских специалистов [Долгая и др., 2017; Богданова и др., 2017]. Полученная зависимость представлена на рисунке 1. Она хорошо согласуется с известными рекомендациями А. А. Долгой [Долгая, 1994] и аппроксимируется формулой:

$$PGA(T) = 2,1 + 4,04 \cdot e^{-T} \quad (2)$$

Для этой кривой на рисунке 2 представлена поправка на период.

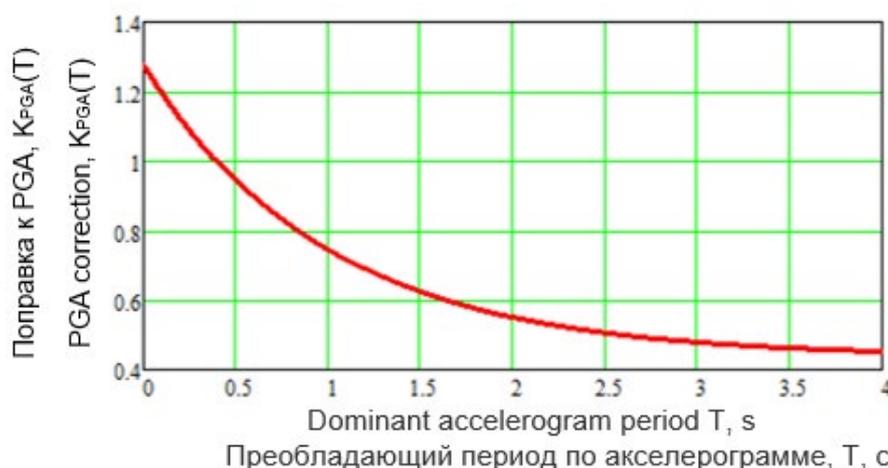


Рис. 2. Зависимость поправки PGA от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений /

Fig. 2. Dependence of the PGA correction on the action prevailing period T according to the processing data of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

При этом формула для поправки к ускорениям от периода T имеет вид:

$$K_{PGA}(T) = 0,437 + 0,84 \cdot e^{-T} \quad (3)$$

Современный Российский ГОСТ (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности) связывает PGA с балльностью следующим образом:

$$I = 2,5 \cdot \lg(PGA) + 1,89. \quad (4)$$

Используя формулы шкалы балльности [Аптикаев, 2012], (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности), нетрудно от расчетных баллов перейти к пиковым ускорениям (PGA)

$$PGA = 10^{\frac{I-1,89}{2,5}}. \quad (5)$$

А балльность I связывается с повторяемостью T известной формулой:

$$\text{Log}(T) = a \cdot I + b. \quad (6)$$

T – повторяемость землетрясения силой I баллов, a , b – константы, характеризующие сейсмическую опасность на площадке строительства.

Таким образом, действующий ГОСТ устанавливает цепочку связей:

повторяемость T ® расчетный балл I ® PGA.

В реализацию этой цепочки надо внести некоторые поправки.

Во-первых, к PGA надо ввести поправки, учитывающие фактический период воздействия. Для инженера представляет интерес именно резонансное воздействие. По этой причине, если нет веских сейсмологических данных, следует рассматривать воздействие с резонансным для сооружения периодом.

Во-вторых, инженерный анализ зависимости (6) показал ее порочность. На основании исследований, выполненных в [Герсеванов, 1923], предлагается два варианта связи повторяемости и расчетного балла. По первому варианту вид зависимости (6) сохраняется, но величина a фиксируется как $a=0,5$ (формула (7)). По второму варианту вместо (6) предлагается зависимость (8):

$$\text{Log}(T) = 0,5I + b; \quad (7)$$

$$\text{Log}(T) = ae^{-aI} + b, \text{ при } a = 0,7. \quad (8)$$

На основе приведенных результатов складывается вполне определенная картина работы заказчиков, инженеров и сейсмологов. Эта картина соответствует тому, что сложилось в настоящее время в Европейских странах.

Заказчик по представлению проектировщика задается повторяемостью предельных состояний. Заметим, что в Италии и во Франции 4 предельных состояния [Aggiornamento delle..., 2018]:

Таблица 1 / Table 1

Возможные варианты сейсмической опасности для объекта, проектируемого по карте «В» карт ОСП / Possible varieties of seismic hazard for an object designed according to the map “B” of the GSZ maps

Ситуационная сейсмичность / Situational seismicity			Расчетные характеристики / Design characteristics					
I_A	I_B	I_C	СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах» / SP 14.13330.2018 “SNIP II-7-81* Construction in seismic regions”			По предложениям авторов / At the suggestion of the authors		
			Повторяемость, годы / Return period, years	Балл / Magnitude	PGA, м/с ² / PGA, m/s ²	Повторяемость, годы / Return period, years	Балл / Magnitude	PGA, м/с ² / PGA, m/s ²
9	9	10	510	8,49	4	770	8,84	6,67
8	9	10	750	8,49	4	770	8,51	4,09
9	9	9	750	8,49	4	770	8,95	6,12
8	9	9	1100	8,49	4	770	8,2	3,00

- отсутствие повреждений (Operation Limit State – SLO), допустимая повторяемость раз в 30 лет;
- возникновение повреждений без нарушения нормальной эксплуатации, при этом сооружение работает в штатном режиме (Damage Limit State), допустимая повторяемость раз в 50 лет;
- возникновение серьезных повреждений, допускающих восстановление сооружения (Ultimate Limit State), допустимая повторяемость раз в 475 лет;
- повреждения, не допускающие восстановление сооружения (Collapse Limit State), допустимая повторяемость раз в 975 лет.

1. По представленной цепочке определяется расчетный балл и PGA, которое корректируется с учетом расчетного периода воздействия. Заметим, что от сейсмологов здесь требуются данные ГОСТ и одно или два числа (а и b), входящие в формулы (6, 7). Никаких карт не требуется! Правда, значения а и b придется задавать для каждого предельного состояния.

2. Отказ от карт сейсмического районирования, как основного документа, создаваемого сейсмологами для строителей весьма актуален. Сложившийся в России порядок оценки уровня расчетного воздействия по карте ОСР приводит к парадоксам. Так, при проектировании по карте В с сейсмичностью 9 баллов возможны минимум 4 варианта ситуационной сейсмичности, приведенные в таблице 1. Для этих вариантов по предложенной методике и программе повторяемости (Арещенко Т. С., Прокопович С. В., Сабирова О. Б., Фролова Е. Д., Уздин А. М. Программа определения пиковых ускорений сейсмического воздействия. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018664350. Авторы: Уздин А. М., Прокопович С. В., Арещенко Т. С., Фролова Е. Д., Сабирова О. Б. Зарегистрирована 14 ноября 2018 г.) повторяемости, определяются расчетный балл и расчетное ускорение. Как видно из таблицы, действующие нормы, базирующиеся на картах ОСР, приводят к неравнонадежным проектам в указанных зонах. Расчетные значения PGA отличаются здесь более, чем в 2 раза.

Рассмотрение величины PGA завершим вопросом картирования этой величины. Вопрос стал модным за последние 20 лет и широко освещен в литературе [Ткаченко и др., 2017; Уломов, Богданов, 2019; Ulomov, 1999; Zaslavsky et al., 2002; и др.]. По мнению авторов, задача картирования пиковых ускорений сама по себе совершенно бессмысленна. Как уже говорилось, PGA ни в коей мере не характеризуют интенсивность сейсмического воздействия. Это хорошо понимают некоторые инженеры и сейсмологи. Интерес для проектировщика представляет карта PGA, построенная одновременно с картой преобладающих периодов. Такая работа выполнена Ю. Заславским и Шапиро для территории Израиля [Zaslavsky et al., 2002].

Перейдем теперь к двум другим кинематическим характеристикам. Это остаточные смещения y_{rez} и коэффициент гармоничности k . Остаточные смещения следует учитывать при проектировании протяженных сооружений. Сейсмологи связывают величину остаточных смещений с магнитудой и параметрами очага землетрясения. Соответствующие зависимости приведены в статье итальянского сейсмолога Fassoli [Faccioli, 2004]. Наличие остаточных смещений связано с возникновением импульса скорости на велосиграмме воздействия [Dmitrovskaya, Uzdin, 2006]. Авторы установили, что такой импульс присутствует на всех записях прошлых землетрясений [Uzdin et al., 2010]. Если величина импульса равна V , а продолжительность t , то остаточное смещение составит Vt .

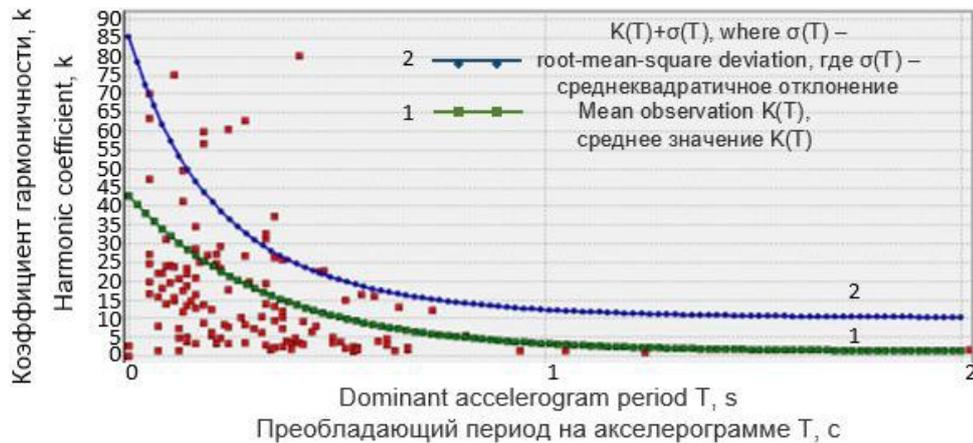


Рис. 3. Зависимость коэффициента гармоничности по результатам обработки записей 1409-тибалльных воздействий /
 Fig. 3. Dependence of the harmonic ratio based on the results of processing of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

Коэффициент k представляется важнейшей кинематической характеристикой. Как отмечается в литературе, эта характеристика не позволяет сосредоточить всю энергию воздействия на одной частоте. При чисто гармоническом воздействии $k=1$. В США в нормах проектирования АЭС и морских платформ [Бирбраер, 1998] рекомендуется принимать $k=5$. Анализ записей, выполненных А. А. Долгой и О. А. Сахаровым [Bogdanova et al., 2000] еще в 2000 г. указывал на существенную зависимость величины k от преобладающего периода воздействия. Этот результат в полной мере подтверждается нашими исследованиями. На рисунке 3 приводится зависимость $k(T)$. Этот результат стыкуется с полученными ранее в [Bogdanova et al., 2000].

Как видно из рисунка 2, падение коэффициента гармоничности с ростом преобладающего периода воздействия весьма существенно. Имеющиеся данные указывают на более высокие значения k для высокочастотных воздействий. Вместе с тем при преобладающем периоде акселерограммы более 1 с его величина оказывается заметно (в 2-3 раза) ниже, чем рекомендуемая американскими нормами [Bogdanova et al., 2000].

Анализ акселерограмм с большим значением k показал, что для них характерны большие остаточные смещения, которые фактически имели место при этих землетрясениях. Авторы не стали исключать остаточные смещения из имеющихся записей, а предложили другой вариант коэффициента гармоничности:

$$K_{mod} = \frac{(y_0^{(max)} - y_{rez}) \cdot \dot{y}_0^{(max)}}{(\dot{y}_0^{(max)})^2}. \quad (9)$$

На рисунке 4 приводится зависимость $k_{mod}(T)$.

Для оценки величины k_{mod} авторы, так же, как в работах [Долгая, 1994; Уздин и др., 2012], использовали распределение Вейбулла. Параметры распределения величины k и k_{mod} при $T=0,3$ с представлены в таблице 2. Для полученных значений параметров авторы построили расчетные значения параметра k_{mod} с заданными вероятностями его превышения. Эти величины приведены в таблице 3. При этом следует иметь в виду, что опасным для сооружения являются малые значения k_{mod} , поэтому в таблице приведены нижние значения доверительных границ.

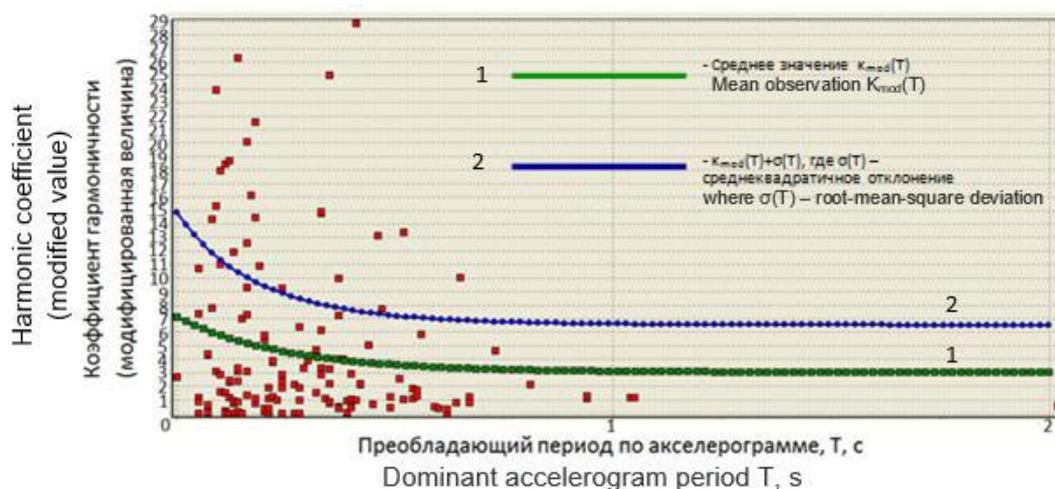


Рис. 4. Зависимость модифицированной величины коэффициента гармоничности (за вычетом остаточного смещения) по результатам обработки записей 1409-тибалльных воздействий / Fig. 4. Dependence of the modified value of the harmonic ratio (minus the residual displacement) based on the results of processing of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

Таблица 2 / Table 2

Параметры распределения k и k_{mod} при T=0,3 с / Distribution parameters k and k_{mod} at T=0.3 s

Величина коэффициента гармоничности при T=0,3 с / The value of the harmonic ratio at T=0.3 s	Среднее значение / Average value	Среднеквадратическое отклонение / Root-mean-square deviation	Коэффициент вариации / Coefficient of variation	Параметр распределения β / Distribution parameter β
Стандартная / Standard	18,10	14,02	0,77	1,30
Модифицированная / Modified	7,55	11,06	1,47	0,70

Таблица 3 / Table 3

Значения величин k и k_{mod} в зависимости от вероятности их превышения при T=0,3 с / The values of k and k_{mod} depending on the probability of their exceedance at T=0.3 s

Значения k в зависимости от вероятности их превышения при T=0,3 с / k values depending on the probability of their exceedance at T=0.3 s			
P, %	30	20	10
Значение k / k value	8,884	6,198	3,485
Модифицированное значение k / Modified k value	1,363	0,697	0,238

Энергетические характеристики сейсмического воздействия

К энергетическим характеристикам сейсмического воздействия относится большое количество характеристик, через которые можно оценить энергию сейсмического воздействия. Анализом этих характеристик начали активно заниматься последние 30 лет с развитием энергетической теории сейсмостойкости.

Классическое уравнение сейсмических колебаний одномассной системы имеет вид:

$$m\ddot{y} + Q(y, \dot{y}) + Cy = -m\ddot{y}_0, \quad (10)$$

где m – масса системы, C – жесткость системы, y – смещение массы относительно основания, y_0 – смещение основания, Q – неупругая составляющая реакции.

Если умножить обе части этого уравнения на $dy = \dot{y}dt$ и проинтегрировать по времени t от начала воздействия ($t = 0$) до его окончания ($t = \tau$), получим новое уравнение (11), которое называется уравнением энергетического баланса:

$$m \int_0^\tau \ddot{y}\dot{y}dt + \int_0^\tau Q(y, \dot{y})\dot{y}dt + \int_0^\tau Cy\dot{y}dt = -m \int_0^\tau \dot{y}_0 dt. \quad (11)$$

Первое слагаемое представляет собой работу сил инерции относительного движения, второе определяет работу сил пластического деформирования $A_{пл}$, третье – работу упругих деформаций, а правая часть – работу сил инерции переносного движения. Расчеты показывают, что первое и третье слагаемые в равенстве (11) относительно невелики. Поэтому, если работа сил инерции превзойдет работу монотонного разрушения, то возможно обрушение несущих конструкций.

• Изложенный подход явился основанием исследований по оценке интеграла в правой части уравнения (11). С этой целью использовались различные характеристики сейсмических воздействий получивших название энергетических [Рутман, 2012а, б, 2015; Erberik, Sucuoglu, 2000; Campbell, Bozorgnia, 2012; Koliopoulos et al., 1998; Uzdin et al., 2010; и др.]. Из энергетических характеристик можно выделить:

- интенсивность по Ариасу, I_A :

$$I_A = \frac{2\pi}{g} I_A^* I_A^* = \int \dot{y}^2 dt; \quad (12)$$

- абсолютная кумулятивная скорость, CAV:

$$CAV = \int |\ddot{y}| dt; \quad (13)$$

- плотность сейсмической энергии, SED:

$$SED = \int \dot{y}^2 dt; \quad (14)$$

- показатель повреждаемости Арайя (потенциал разрушительности), I_{Araya} :

$$I_{Araya} = \frac{I_A}{v_0^2}, \quad (15)$$

где v_0 – количество нулевых пересечений в акселерограмме на единицу времени.

- среднеквадратическое ускорение, σ ;
- показатель Парка-Анга (Park-Ang damage index):

$$I_c = a_{rms}^{1,5} \cdot \sqrt{t_d}. \quad (16)$$

К числу энергетических показателей можно отнести и продолжительность сейсмического воздействия τ . В [Campbell, Bozorgnia, 2012] для оценки величины τ обрезаются начальные и конечные участки, на которых $\dot{y}_0 < 0,025$ [м/с²]. В [Айзенберг, 1981] отбрасываются участки, на которых вклад в величину I_A не превосходит 2,5% от его полного значения. Величина энергетической характеристики с учётом отброшенных временных интервалов называется, согласно [Campbell, Bozorgnia, 2012], стандартной величиной характеристики. Иными словами:

$$I_{A,std} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{y}^2 dt, \quad (17),$$

причём $\int_0^{\tau_1} \dot{y}^2 dt \approx 0,025 I_A$ и $\int_{\tau_2}^{\tau} \dot{y}^2 dt \approx 0,025 I_A$.

На рисунках 5-7 представлены зависимости интенсивности по Ариасу, CAV_{STD} , интенсивности Парка-Анга от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений.

Как мы видим, интенсивность по Ариасу и величина CAV слабо меняются с ростом преобладающего периода по акселерограмме, причем величина I_A слабо убывает, а величина CAV слабо возрастает (рис. 5, 6). Этот вывод относится к стандартным значениям анализируемых величин, принятым в соответствии с рекомендациями [Айзенберг, 1981]. Среднеквадратическое отклонение при найденных аппроксимациях составило соответственно 6,84 для интенсивности по Ариасу и 21,88 по CAV . Этот результат позволяет заключить, что указанные величины можно считать постоянными. Как видно из рисунка 7, интенсивность Парка-Анга слабо убывает с ростом преобладающего периода по акселерограмме. В таблице 4 при-

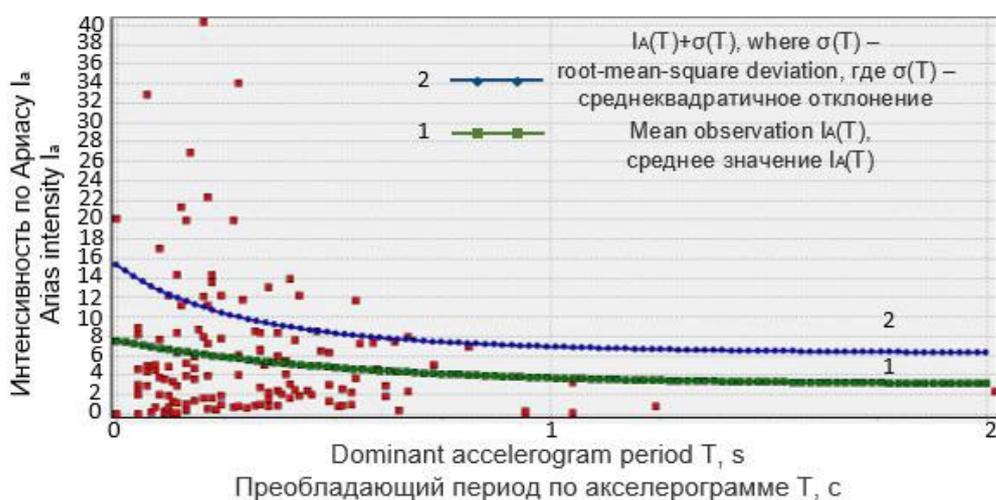


Рис. 5 Зависимость интенсивности по Ариасу от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений /

Fig. 5 Dependence of the Arias intensity on the prevailing period of influence T according to the processing data of 140 records of 9-magnitude earthquakes

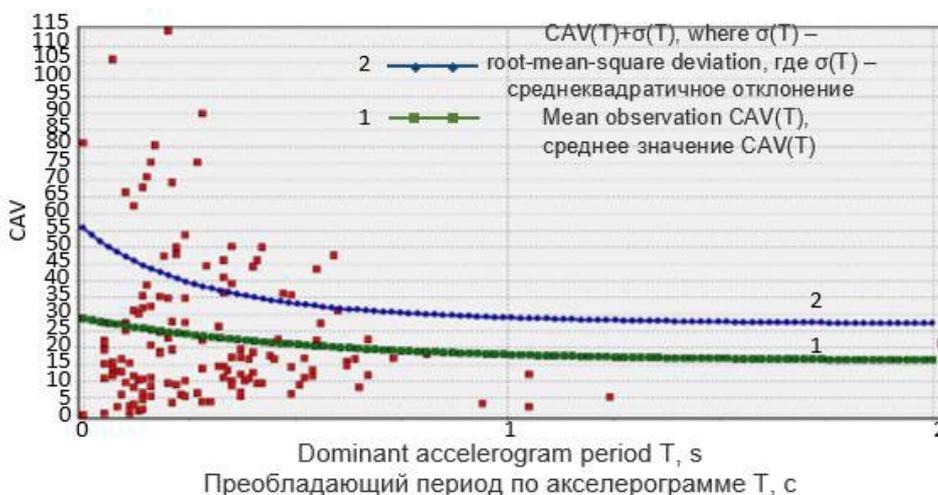


Рис. 6. Зависимость интенсивности Парка-Анга от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений /

Fig. 6. Dependence of the Park-Ang intensity on the action prevailing period T according to the processing data of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

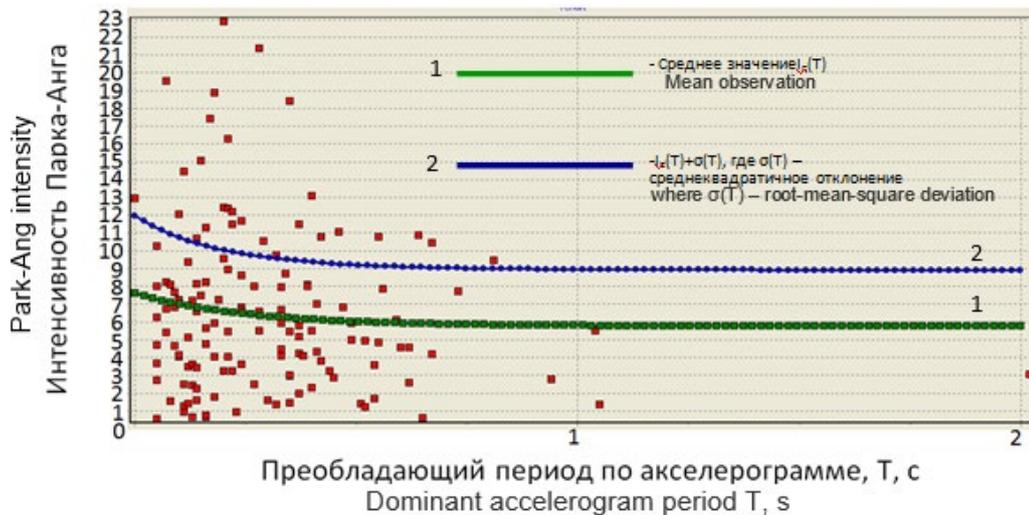


Рис. 7. Зависимость интенсивности Парка-Анга от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений /

Fig. 7. Dependence of the Park-Ang intensity on the prevailing period of influence T according to the processing data of 140 records of 9-magnitude earthquakes

ведены рекомендуемые значения рассматриваемых величин и их среднеквадратическое отклонение.

Для оценки энергетических характеристик авторы также использовали распределение Вейбулла. Величины постоянных энергетических характеристик при их различной обеспеченности представлены в таблице 5.

Полученный результат указывает на независимость энергетических характеристик от спектрального состава воздействия в рамках заданного макросейсмического балла. Этот факт соответствует принципу назначения балла по повреждениям

Таблица 4 / Table 4

Энергетические характеристики 9-тибалльных землетрясений / Energy characteristics of 9-magnitude earthquakes

Характеристика / Characteristic	Среднее значение / Average value	Среднеквадратическое отклонение / Root-mean-square deviation	Коэффициент вариации / Coefficient of variation	Параметр распределения β / Distribution parameter β	Параметр распределения θ / Distribution parameter θ
Интенсивность по Ариасу I_A / Arias intensity I_A	5,83	6,84	1,173	0,856	5,022
Абсолютная кумулятивная скорость CAV / Cumulative absolute velocity CAV	23,95	21,88	0,91	1,096	24,791
Среднеквадратическое ускорение σ_A / Root-mean-square acceleration σ_A	1,26	0,58	0,44	2,28	1,42
Интенсивность Парка-Анга I_c / Park-Ang intensity I_c	6,47	4,49	0,69	1,47	6,01

Таблица 5 / Table 5

Величины постоянных энергетических характеристик при их различной обеспеченности / The values of constant energy characteristics at their different availability

Обеспеченность, % / Availability, %	CAV, м/с / CAV, m/s	$I_A, \text{м}^2/\text{с}^3 / I_A, \text{м}^2/\text{с}^3$	$\sigma_A, \text{м}/\text{с}^2 / \sigma_A, \text{м}/\text{с}^2$	$I_c, \text{м}^{1.5}/\text{с}^2 / I_c, \text{м}^{1.5}/\text{с}^2$
40	22,89	4,534	1,366	5,66
30	29,366	6,238	1,539	6,82
20	38,271	8,756	1,748	8,31
10	53,062	13,305	2,045	10,61

сооружений. Для повреждения зданий надо совершить работу, а для этого надо обладать энергией. Поэтому землетрясения одного балла должны иметь одинаковую энергию.

Полученные данные позволяют однозначно утверждать, что между рассмотренными энергетическими характеристиками имеется линейная зависимость. На рисунке 8 приведена зависимость CAV от интенсивности по Ариасу, а на рисунке 9 – аналогичная зависимость для величины SED.

Для среднеквадратического ускорения такая зависимость отсутствует. Это связано с тем, что первые три характеристики полностью характеризуют процесс сейсмических колебаний, учитывая как интенсивность, так и продолжительность воздействия. Что касается среднеквадратического ускорения, то оно характеризует только средние значения ускорений. По этой причине к среднеквадратическому ускорению для описания силы землетрясения необходимо задавать и продолжи-

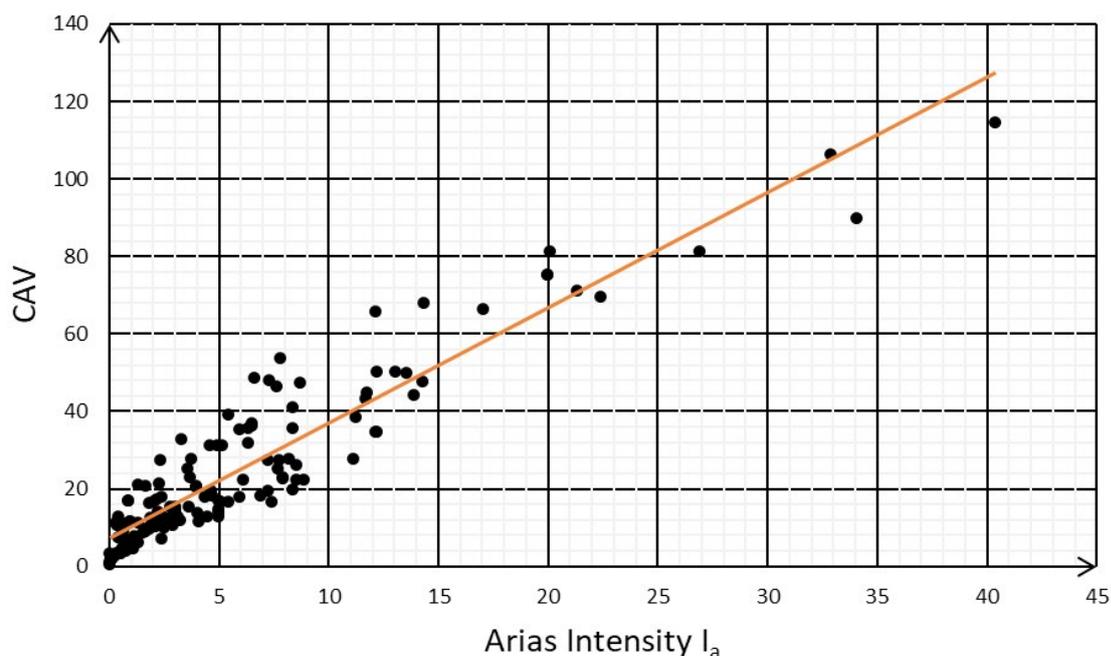


Рис. 8. Зависимость CAV от интенсивности по Ариасу /
Fig. 8. CAV dependence on Arias intensity

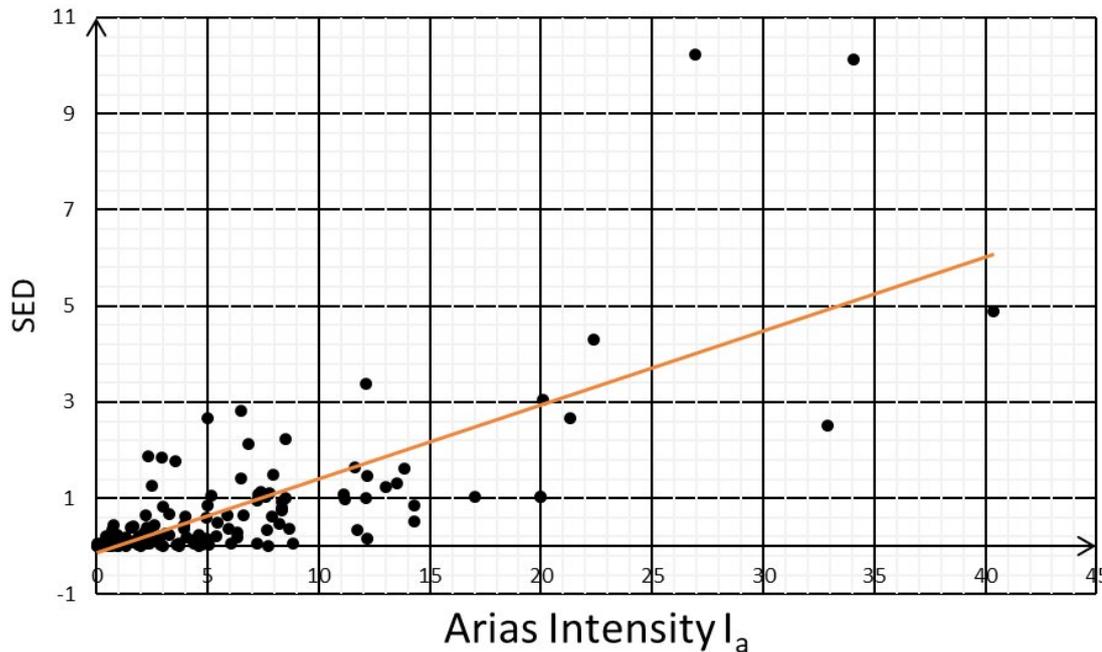


Рис. 9. Зависимость SED от интенсивности по Ариасу /
Fig. 9. SED dependence on Arias intensity

Таблица 5 / Table 5

Коэффициент регрессии / Regression coefficient

Характеристика / Characteristic	A	B
SED	0,15401	-0,14543
CAV	2,9778	7,157164

тельность воздействия.

Спектральные характеристики сейсмического воздействия

Данные характеристики определяют спектральный состав воздействия, а также реакцию сооружения в различном частотном диапазоне.

Рассмотрим сначала известные характеристики, связанные только со спектральным составом воздействия.

Простейшей спектральной характеристикой является *преобладающий период воздействия* T (преобладающая частота ω). Преобладающий период воздействия широко используется в нормативной (СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах»), учебной [Уздин и др., 2012] и научной литературе [Курбацкий, 2018]. Однако вопрос задания преобладающего периода далеко не так прост, как кажется на первый взгляд. При задании преобладающего периода чаще всего имеют в виду период, соответствующий пику на спектре ускорений акселерограммы. Между тем, преобладающие периоды акселерограммы и сейсмограммы воздействия могут существенно различаться.

Наиболее полная информация о спектральном составе землетрясения задается спектрами Фурье. Эти характеристики широко используются в литературе и проектной практике. Однако спектр Фурье не дает реакции сооружения на воздействие.

Перейдем теперь к характеристикам, определяющим реакцию сооружения на воздействие. С инженерной точки зрения более удобными оказались не спектры

Фурье, а спектры ответов маятника на рассматриваемое воздействие. Между спектрами ответа и спектрами Фурье имеется связь, рассмотренная в известной монографии [Курбацкий, 2018] и дополненная в статье [Тяпин, 2020]. Использование и особенности построения спектров хорошо описаны в литературе [Курбацкий, 2018; Тяпин, 2018]. Для расчета сооружений по ЛСМ базовым является спектр ускорений.

Сейсмологи, как правило, могут задать ожидаемый спектр на площадке строительства [Аптикаев, Эртелева, 2005], а по этому спектру могут быть сгенерированы акселерограммы. Однако следует иметь в виду, что небольшие отклонения в положении пика на спектре, могут вести к большим изменениям реакции сооружений особенно слабодемпфированных. Поэтому сложившийся подход задания спектров, как основы моделирования воздействия, даже при корректном задании амплитуды воздействия, не является консервативным и, по нашему мнению, не может использоваться при генерации расчетных акселерограмм без учета других характеристик воздействия.

К сожалению, его применение для расчета смещений весьма проблематично. Исследования показывают, что при использовании спектра ускорений для задания расчётного воздействия, смещения рискуют оказаться заниженными. При этом спектры кинематических характеристик решают задачи расчёта сооружений на проектное землетрясение, а также задачи, в которых выполняется оценка предельных смещений. Данные же по спектрам смещений реальных землетрясений до сих пор отсутствуют.

Для оценки сейсмостойкости сооружений за пределами упругости при сильных воздействиях также можно предложить спектральные характеристики воздействия. Работы этого направления ограничены. В статьях [Уздин, 2018] предложено использовать **спектры работ сил пластического деформирования** PFW (Plastic forces work – работа сил пластического деформирования), как критерий силы землетрясения. Этот подход имеет смысл использовать для оценки сейсмостойкости упругопластических систем. Для систем с хрупким механизмом накопления повреждений предложен новый тип спектров – **спектры повреждаемости** χ .

- **Спектр работ сил пластического деформирования**

Упругопластическая модель описана в [Уздин, 2018], где для определения PFW рассматривается упругопластический маятник с диаграммой Прандтля (рис. 10). Диаграмма характеризуется углом наклона α для первого участка диаграммы и пределом упругости F_{el} с предельным смещением u_{el} . Жесткость системы $C = tg\alpha$, а период колебаний при отсутствии проскальзывания $T = 2\pi/k$; где $k^2 = C/m$; m – масса системы; предел упругости удобно выразить через условный коэффициент трения $f = F_{el}/mg$.

В процессе нагружения силы пластического деформирования работают только на втором участке диаграммы.

Для построения спектра работы сил пластического деформирования $W(T)$ рассматриваются уравнения:

- на участке OA:

$$\ddot{y} + \gamma k \dot{y} + k^2 y = -\ddot{y}_0; \quad (18)$$

- на участке AB:

$$\ddot{y} + g f \text{sign}(\dot{y}) = -\ddot{y}_0. \quad (19)$$

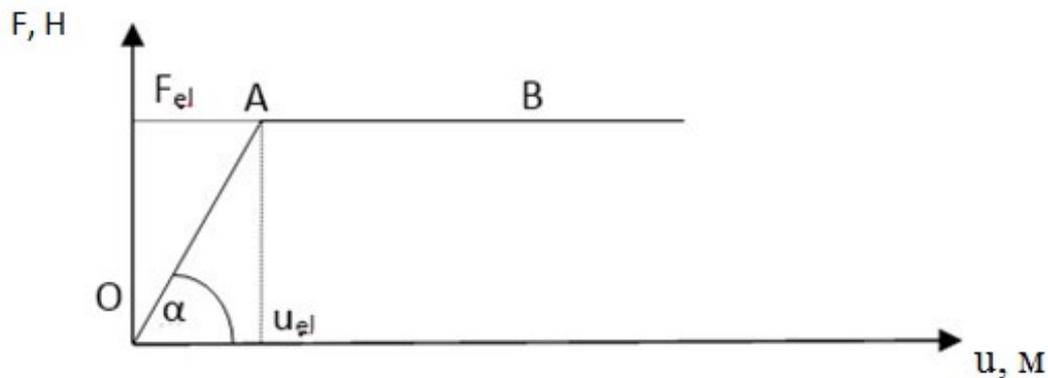


Рис. 10. Диаграмма «сила-смещение» системы для оценки силы землетрясения /
Fig. 10. Diagram "intensity-displacement" of the system for assessing the earthquake intensity

В уравнение (18) включена сила внутреннего трения в материале, характеризующая коэффициентом неупругого сопротивления g . Значение g влияет на величину W . У объектов массовой застройки значение g изменяется в пределах от 0,08 до 0,2. Нижняя граница относится к металлическим и монолитным железобетонным конструкциям на скальных грунтах. Верхняя граница относится к жестким сооружениям на сильносжимаемых грунтах. Для оценки силы землетрясения разумно использовать сооружение-представитель с $g=0,1$, как усреднённое значение, характерное для 4-5-тиэтажных зданий на плотных нескальных основаниях [Савинов, Уздин, 1979].

Решения уравнений (18), (19) имеют стандартный вид и на участке интегрирования записываются аналитически [Уздин и др., 2012]. Интегрирование начинается на участке OA (18), а переход на участок AB происходит, если сила упругости S_y превысит предел упругости F_{el} . Возврат с участка AB на участок OA происходит при смене знака скорости массы относительно основания.

Построив спектры элементарных работ $W(T)$ для каждого f , можно определить потенциальную разрушительную способность землетрясения, что представляется объёмом фигуры, образованной поверхностью $W(T, f)$ (рис. 11).

Объём этой фигуры PFW вычисляется следующим образом:

$$PFW = \int_0^{T_{\max}} \int_0^{f_{\max}} W(T, f) dT df. \quad (20)$$

Исследования [Уздин, 2018а, б] показали, что даже при больших различиях в наиболее широко используемых характеристиках сейсмического воздействия (PGA, I_A, CAV, κ) спектры элементарных работ сил пластического деформирования $W(T)$ при равных коэффициентах условного трения f и близких значениях преобладающего периода воздействия T оказываются близкими. Это подтверждается полученной в статье [Долгая и др., 2020] зависимостью PFW от преобладающего периода T (рис. 12) для фиксированных значений, так как, согласно этой статье, работа сил пластического деформирования практически не зависит от преобладающего периода воздействия:

$$PFW(T_{bq}) = -0,008 \cdot e^{-12 \cdot T_{bq}} - 0,116 \cdot e^{-12,08 \cdot T_{bq}} - 0,259 \quad (21)$$

$$\sigma(T_{bq}) = \pm(-0,005 \cdot e^{-19 \cdot T_{bq}} - 0,08 \cdot e^{-12,079 \cdot T_{bq}} + 0,133) + PFW(T_{bq}) \quad (22)$$

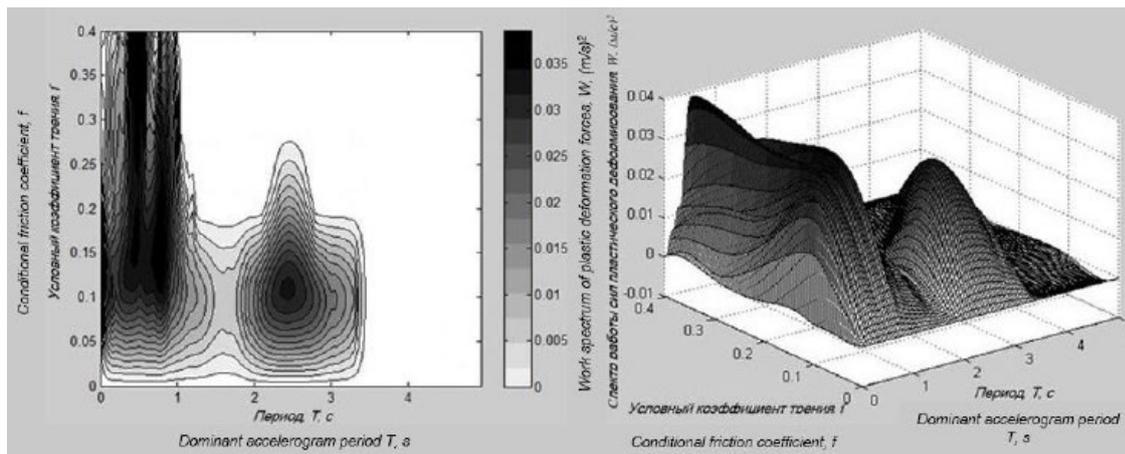


Рис. 11. Спектр работы сил пластического деформирования $W(T, f)$ /
 Fig. 11. Spectrum of work of the plastic deformation forces $W(T, f)$

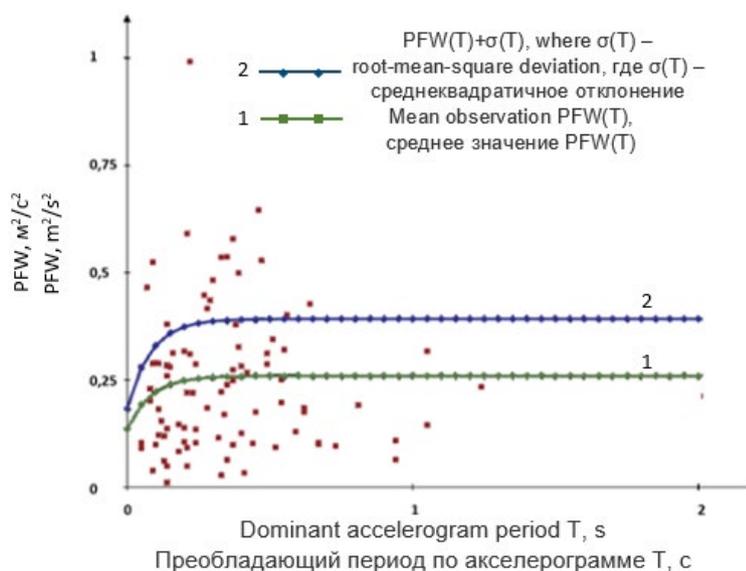


Рис. 12. Зависимость величины PFW от преобладающего периода воздействия T /
 Fig. 12. Dependence of the PFW value on the prevailing period of influence T

Предлагаемый показатель оценки сил землетрясения отражает физический смысл макросейсмического балла и не требует каких-либо условностей, связанных с установлением продолжительности землетрясения. Отсечение «безопасных» участков происходит автоматически, при этом, оно зависит от свойств сооружения. Кроме того, предлагаемый показатель дает о землетрясении больше информации, чем использование макросейсмического балла. Например, высокочастотное землетрясение на территории, застроенной гибкими сооружениями, не приведёт к большому объему повреждений и будет охарактеризовано как слабое или умеренное. Вместе с тем, на территории, застроенной малоэтажными жесткими зданиями, это же землетрясение вызовет большой объем разрушений и будет охарактеризовано как сильное. При использовании предлагаемого показателя силы землетрясения оно само найдёт объекты, которые может разрушить, что позволяет объективно оценить его силу.

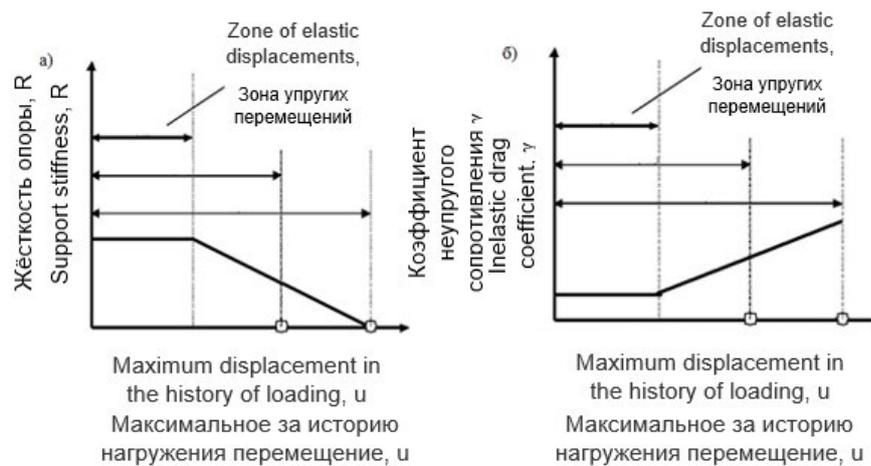


Рис. 13. Зависимость жесткости сооружения (а) и коэффициента неупругого сопротивления сооружения (б) от максимального за историю нагружения перемещения опоры /
 Fig. 13. Dependence of the structure rigidity (a) and the coefficient of inelastic resistance of the structure (b) on the maximum displacement of the support during the period of loading

• Спектры повреждаемости сейсмического воздействия

Для адаптивных систем с деградирующей жесткостью приходится использовать модель, в которой по мере накопления повреждений жесткость системы будет падать, а период основного тона колебаний и затухание в системе – возрастать.

В качестве критерия накопления повреждений используется показатель повреждаемости s и текущий период основного тона колебаний сооружения T .

Для описания процесса накопления повреждений авторы использовали простую модель Кирикова-Аманкулова [Аманкулов, 1980], в которой после начала трещинообразования жесткость линейно падает, а показатель повреждаемости и демпфирование линейно растут с ростом максимального за историю нагружения перемещения системы. Показатель повреждаемости s линейно возрастает, а период колебаний линейно падает с ростом максимального за историю нагружения перемещения системы u . Для данного типа накопления повреждений восстанавливающая сила описывается уравнением:

$$R(y) = \frac{r(u) \cdot y}{1 + k(u) \cdot y^2}, \quad (23)$$

где y – смещение опоры; u – максимальное за историю нагружения перемещение опоры; k – параметр нелинейности.

Жесткость системы постоянна, пока величина смещения u меньше предела упругости $u_{упр}$. Когда предел упругости превышен, жесткость начинает линейно падать с увеличением значения максимального за историю смещения системы. Перемещение, соответствующее нулевой жесткости системы, названо условным перемещением разрушения $u_{усл}$. Фактически, перемещение, при котором происходит разрушение сооружения, считается перемещением $u_{разр}$, при котором реакция системы достигает максимального значения. Зависимости $R(u)$ и $g(u)$ показаны на рисунке 13.

Системы с рассматриваемым типом нелинейности относятся к числу адаптивных систем, которые за счет возникновения повреждений отстраиваются от резонанса. Для таких систем Я.М. Айзенбергом введено понятие спектра состояний

системы [Айзенберг, 1981]. Система приспособляется к программе нагружения, если спектр состояний пересечёт в некоторой точке спектр реакции.

Колебания системы с деградирующей жёсткостью описываются уравнением:

$$m\ddot{y} + \gamma(u)\sqrt{r(u)m\dot{y}} + R(u) = -m\ddot{y}_0. \quad (24)$$

где y, \dot{y}, \ddot{y} – соответственно перемещение, скорость и ускорение сооружения; m – масса сооружения; $\gamma(u)$ – коэффициент неупругого сопротивления; $R(u)$ – жесткость системы; $\ddot{y}_0(t)$ – акселерограмма колебаний основания.

Интегрирование уравнения (24) осуществляется стандартными методами. Если в пределах шага интегрирования менялись характеристики системы, то ее параметры меняются в соответствии с изменением этих характеристик.

В результате можно получить зависимости конечного (после сейсмического воздействия) периода и коэффициента повреждаемости системы от начального периода ее колебаний, т. е. спектры периодов и спектры повреждаемости системы.

Результаты работы и их обсуждение

Моделирование или выбор расчетных акселерограмм проектировщик осуществляет с учетом свойств сооружения и рассмотренных характеристик воздействия.

Прежде всего инженер должен передать сейсмологу диапазон опасных для сооружения частот воздействия. Исходя из них сейсмолог передает два коэффициента a и b , определяющих связь повторяемости с расчетной балльностью в заданном частотном диапазоне. Далее, проектировщик с заказчиком определяют приемлемые повторяемости предельных состояний и по ним оценивают расчетный (дробный) балл и соответствующие значения PGA по шкале балльности с учетом поправки на частотный диапазон.

После задания пиковых ускорений можно выбирать или моделировать опасные воздействия с резонансными для сооружения частотами. При этом следует соблюдать требования к характеристикам воздействия, исходя из рассматриваемых предельных состояний конструкции.

Если, например, меня интересует работоспособность аппарата искусственного дыхания в операционной, то мне достаточно использовать величину PGA и спектр ускорений.

При расчете смещений пролетного строения относительно опоры моста инженера интересует спектр смещений. При этом если пролет соскочит с опоры на 0.0001 с, назад он уже не запрыгнет. Поэтому учет работы за пределами предельного смещения не имеет смысла. Другое дело опоры моста. Для их расчета основными являются энергетические характеристики и спектр повреждаемости. Величина PGA может быть второстепенной. Для металлических пролетных строений определяющими также являются энергетические характеристики, но оценку опасности воздействия следует оценивать с использованием спектра работы сил пластического деформирования.

Еще один интересный пример – сейсмоизолированные здания. Грамотно запроектированные сейсмоизолированные объекты не боятся больших ускорений. Для них опасны большие взаимные смещения сейсмоизолированных частей. Вплоть до обрушения сейсмоизолированное сооружение работает в упругой стадии, поэтому для него опасны длиннопериодные резонансные колебания с оценкой их опасности по спектру смещений.

Мы видим, что инженер работает с набором расчетных воздействий, соответствующих рассматриваемому предельному состоянию. При этом он оперирует критериями опасности и характеристиками воздействия, определяющими его опасность с точки зрения рассматриваемого предельного состояния. От сейсмологов инженеру нужна инструментальная часть шкалы балльности, которая в досточно удобной форме представлена в ГОСТ (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности) и два (или один) коэффициента, характеризующие повторяемость сотрясений заданной силы.

Далее инженер может самостоятельно или с привлечением сейсмологов выбрать набор расчетных акселерограмм, опасных для сооружения. Можно сгенерировать опасную акселерограмму, например, по методике, изложенной в [Смирнова, 2019].

В ряде случаев возможен своего рода конфликт прогнозов инженера и сейсмолога. Например, один из авторов столкнулся в свое время с проектом сейсмоизолированного дома в Армении. Сейсмоизоляция была относительно слабодемпфированной. Руководителю проекта сказали, что при длиннопериодных воздействиях с периодом более 1,5 с здание может упасть с опор, на что он предъявил справку АН Армянской ССР о том, что в Армении не может быть землетрясений с периодом более 0,5 с. Авторы понимают такую ситуацию. Она приводит к удешевлению конструкции и снижению сроков строительства. Но, по мнению авторов, сейсмологи должны нести полную юридическую и экономическую ответственность за свои рекомендации наряду с инженерами в случае чрезвычайной ситуации. Если их рекомендации не имеют юридической силы, соответствующая ответственность лежит на главном инженере проекта. Хорошо известен случай в Италии, когда по представлению прокурора сейсмологи должны получить реальные тюремные сроки за ошибочные прогнозы сейсмической опасности в городе Аквиле, пострадавшем после сильного землетрясения в 2009 году. Реальный срок должен получить и представитель администрации города, который, по-видимому, просил ученых не завышать сейсмическую опасность с целью экономии бюджетных средств.

Следует отметить, что есть одна важная область, в которой прогнозы сейсмологов имеют весьма большое значение. Это оценка сейсмостойкости урбанизированных территорий. Дело в том, что инженер при проектировании вынужден исходить из консервативных принципов и закладывать в конструкцию определенные запасы. Это видно из изложенного выше подхода к моделированию воздействия, аналогичная ситуация возникает с системой расчетных коэффициентов СП. Еще одним важным фактором является типовое проектирование. В СССР это был основной принцип проектирования, когда крупные институты разрабатывали типовые проекты, а на месте осуществлялась их привязка к местным условиям. Естественно типовые проекты имели определенные запасы. Например, пролетное строение моста пролетом 110 м – это грандиозное дорогостоящее сооружение. Его элементы выполняются по кондукторам. Завод не имеет возможности иметь несколько кондукторов, максимум два для сейсмостойкого и несейсмостойкого исполнения. Соответственно при проектировании закладываются запасы на возможность типового изготовления. При оценке сейсмостойкости старой застройки возникает необходимость выявить эти запасы. В том числе запасы возможно выявить (если они есть) за счет использования местных условий и региональной спектральной кривой. Здесь взаимодействие инженеров, сейсмологов и администрации особенно важно.

Выводы

Для задания расчетного сейсмического воздействия инженеру достаточно пользоваться имеющейся инструментальной частью шкалы балльности [Гузеев, 2009] и зависимостью расчетного балла от его повторяемости в рамках опасного для сооружения частотного диапазона. Последняя задается одним или двумя параметрами. Карты ОСР являются лишними и только путают проектировщика.

Сейсмическое воздействие задается опасным для сооружения, исходя из его возможных предельных состояний. При этом должны учитываться реальные характеристики сейсмического воздействия.

Для характеристики сейсмического воздействия необходимо задать большую группу кинематических, спектральных и энергетических характеристик. Как показали исследования, часть этих характеристик не зависит практически от спектрального состава воздействия. К числу таких характеристик относятся интенсивность по Ариасу, среднеквадратическое ускорение и абсолютная кумулятивная скорость. Эти величины могут быть использованы в качестве показателя силы сейсмического воздействия.

При задании PGA возникает необходимость учета зависимости этой величины от преобладающего периода воздействия. Полученные авторами результаты хорошо согласуются с известными рекомендациями А. А. Долгой и шкалой балльности (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности).

Спектральные кинематические характеристики, прежде всего спектр ускорений, широко применяется в теории сейсмостойкости для определения сейсмической нагрузки. При этом PGA не характеризует силу сейсмического воздействия. Применение спектра ускорений, наряду с PGA, позволяет корректно рассчитывать только линейно-упругие системы. Однако задание упругого спектра ответа не характеризует повреждаемость сооружений от землетрясения. Для этого авторами предлагается использовать спектральные энергетические характеристики, которые позволяют оценить разрушающую способность воздействия и подобрать опасное воздействие для оценки пластических деформаций и повреждаемости сооружения.

Литература

1. Айзенберг Я. М. Спектры состояния систем с деградирующей жесткостью и их применение для оценки сейсмической реакции сооружений. // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер. 14. Сейсмостойкое строительство. – 1981. – Вып. 6. – С. 24-29.
2. Аманкулов Т. Исследование поведения одномассовой системы с нелинейностью гистерезисного типа при сейсмическом воздействии. / Т. Аманкулов, Б. А. Кириков. // Сейсмостойкое строительство. – 1980. – № 8. – С. 16-23.
3. Аптикаев Ф. Ф., Эртелева О. О. Проектные и реальные спектры реакции: проблема точности задания сейсмических воздействий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – № 1. – С. 43-45.
4. Аптикаев Ф. Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф. Ф. Аптикаев; Рос. акад. наук, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – М.: Наука и образование, 2012. – 175 с.
5. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб.: Наука, 1998. – 254 с.
6. Богданова М. А., Нестерова О. П., Никонова Н. В., Ткаченко А. С., Уздин А. М., Рахманова М., Азаев Т. М., Зайнулабидова Х. Р. Числовые характеристики сейсмических воздействий. // Наука и мир. – 2017. – № 3 (43). Т. 1. – С. 49-55
6. Бугаев Е. Г. Выбор ограниченного набора акселерограмм для проектирования уни-

фицированной АЭС и типового оборудования. // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер. 14. Сейсмостойкое строительство. – 1982. – №9. – С. 4-9.

7. Вахрина Г. Н., Смирнов В. И. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 1. – С. 29-39.

8. Герсеванов Н. М. Применение математической логики к расчету сооружений. – М.: ОНТИ, 1923. – 334 с.

9. Гузев Р. Н. Алгоритм генерации синтетических акселерограмм из условия максимального совпадения спектра отклика и нормативной кривой динамичности. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2009. – № 10. – С. 17-19.

10. Давыдова Г. В., Огнева С. В., Уздин А. М., Федорова М. Ю. Генерация расчетных акселерограмм для оценки сейсмического риска. // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2011. – №4. – С. 42-47.

11. Долгая А. А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом. // Э-И. ВНИИТПИ. Сер. «Сейсмостойкое строительство». – 1994. – Вып. 5-6. – С. 56-63.

12. Долгая А. А., Сибуль Г. А., Прокопович С. В., Уздин А. М. Энергетическая характеристика силы сейсмического воздействия. // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений». – 2020. – № 2 (45). – С. 17-23.

13. Долгая А. А., Нестерова О. П., Прокопович С. В., Уздин А. М., Чанг Юань, Гуань Юхай, Ван Хайбинь. Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений. // Российско-китайский научный журнал «Содружество». Ежемесячный научный журнал научно-практической конференции. – 2017. – № 20. Ч. 1. – С. 59-66.

14. Курбацкий Е. Н. Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения: теория и приложение. / Е. Н. Курбацкий. – М.: Сросэкспертиза, 2018. – 155 с.

15. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. – Киев: «Сталь», 2002. – 600 с.

16. Рутман Ю. Л. Анализ возможностей применения энергетического критерия SAV для расчета сейсмостойкости сооружения. / Ю. Л. Рутман, Э. Симборт. // IX Всеукраинская науч.-техн. конф. «Строительство в сейсмических районах Украины». – Киев: ДП НДІБК, 2012а. – С. 618-625.

17. Рутман Ю. Л. Анализ нагруженности сооружения на основе величины энергетического критерия интенсивности землетрясения. / Ю. Л. Рутман. // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012б. – № 2. – С. 61-63.

18. Рутман Ю. Л. Оценка сейсмической энергии, поступившей в упругопластическую систему с одной степенью свободы. / Ю. Л. Рутман, А. Д. Шивуа. // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 2 (49). – С. 64-74.

19. Савинов О. А. Сейсмогенные разрывы и оценка сейсмической опасности на участках строительства больших плотин. // В сб. «Сеймотектоника южных районов СССР». – М.: Наука, 1978. – С. 121-126.

20. Савинов О. А., Уздин А. М. Об учете грунтовых условий в расчетах на сейсмостойкость крупных инженерных сооружений. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1979. – № 6. – С. 61-65.

21. Смирнова Л. Н., Уздин А. М., Прокопович С. В. Некоторые особенности моделирования расчетных акселерограмм. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – № 1. – С. 33-41.

22. Ткаченко А. М., Нестерова О. П., Долгая А. А., Смирнова Л. Н., Уздин А. М. Карты сейсмического районирования в физических величинах – миф или реальность. Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: сб. тез. докл. X междунар. Конф. По проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, 23-25 мая 2017 г. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – 112 с., 77-79 с.

23. Тяпин А. Г. Спектры ответа и спектры Фурье: установлена ли связь между ними? // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020. – № 6 (49). – С. 47-50.
24. Тяпин А. Г. Современные нормативные подходы к расчету ответственных сооружений на сейсмические воздействия. – М.: АСВ, 2018. – 517 с.
25. Уздин А. М., Елизаров С. В., Белаш Т. А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 501 с.
26. Уздин А. М. Универсальная энергетическая характеристика землетрясения. // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018а. – № 3. – С. 23-26.
27. Уломов В. И., Богданов М. И. Новый комплекс карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012). // Инженерные изыскания. – 2013. – № 8. – С. 30-39.
28. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (18A00716). MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI. DECRETO 17 gennaio 2018. // Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 42 del 20 febbraio 2018. – Serie generale. – 2018. – No. 8. – 372 p.
29. Bogdanova G. A., Dolgaya A. A., Ivanova J. V, Sakharov O. A., Uzdin A. M. The model of seismic impact as a short temporary process for calculating of the seismoisolated systems. // 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1358, New Zealand, 2000.
30. Dmitrovskaya L. N., Uzdin A. M. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales. // First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006. – Paper Number: 32
31. Dowric D. J. Earthquake resistant Design for Engineers and architects. – New York: John Wiley & Sons, 1977.
32. Erberik M. A., Sucuoglu H. Energy-based low-cycle fatigue characteristics of degrading structures. // Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 118. – 2000.
33. Faccioli E. Displacement Spectra for Long Periods. / E. Faccioli, R. Paolucci, J. Rey // Earthquake spectra. – 2004. – Vol. 20. No. 2. – pp. 347-376.
34. Campbell K. W., Bozorgnia Y. Cumulative Absolute Velocity (CAV) and Seismic Intensity Based on the PEER-NGA Database. // Earthquake Spectra. – 2012. – Vol. 28. No. 2. – pp. 457-485.
35. Koliopoulos P. K., Margaris B. N., Klimis N. S. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. // J. of Earthq. Eng. – 1998. – Vol. 2. No. 3. – pp. 391-417.
36. Micov V. S., Petrovski J. T. Dynamic response and performance evaluation of multi-span highway bridges with displacement control. // Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 197. – 2000.
37. Park R., Paulay T. Reinforced Concrete Structures. – New York: John Wiley & Sons, 1975.
38. Ulomov V. I. and the Working Group of the GSHAP Region 7. Seismic hazard of Northern Eurasia. // AnnaliGeofis. – 1999. – Vol. 42. – pp. 1023-1038.
39. Uzdin A. M., Prokopovich S. V. Some principles of generating seismic input for calculating structures. // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 157. 0602. KTTI-2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706021>
40. Uzdin A. M., Dmitrovskaya L. N., Sakharov O. A. Setting the Level of Design Acceleration on the Basis of the Energy Theory of Earthquake Engineering. // Fourteen European Conference on Earthquake Engineering, Macedonia, Ochrid. – 2010, CD-paper № 189, Abstract Book. p. 98
41. Zaslavsky Y., Shapira A., and Kenigsberg M. Earthquake site response study for designed bridges in Israel. // The proceedings of the 12-th European conference on earthquake engineering (12-th ECEE), 9-13 September 2002, Barbican Centre, London, UK; Paper reference 059.

References

1. Aizenberg Ya.M. Spectra of the state of systems with degrading stiffness and their application to assess the seismic response of structures. Express information VNIIS. Ser. 14. Earthquake Engineering. 1981. Issue. 6. pp. 24-29. (In Russ.)
2. Amankulov T. Study of the behavior of a single-mass system with hysteresis-type nonlinearity under seismic impact. ed. T. Amankulov, B.A. Kirikov. Earthquake Engineering. 1980. No. 8. pp. 16-23. (In Russ.)
3. Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Design and real response spectra: the problem of the accuracy of specifying seismic effects. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2005. No. 1. pp. 43-45. (In Russ.)
4. Aptikaev F.F. Instrumental scale of seismic intensity. RAS, Schmidt Institute of Physics of the Earth. Moscow. Science and education. 2012. 175 p. (In Russ.)
5. Birbraer A.N. Calculation of structures for seismic resistance. Saint Petersburg, Nauka. 1998. 254 p. (In Russ.)
6. Bogdanova M.A., Nesterova O.P., Nikonova N.V., Tkachenko A.S., Uzdin A.M. et al. Numerical characteristics of seismic impacts. Science and World. 2017. No. 3. Issue 43. Vol. 1. pp. 49-55 (In Russ.)
7. Bugaev E.G. Selection of a limited set of accelerograms for the design of a unified NPP and standard equipment. Express information VNIIS. Ser. 14. Earthquake Engineering. 1982. No. 9. pp. 4-9. (In Russ.)
8. Vakhrina G.N., Smirnov V.I. Development of models for computational accelerograms of seismic impacts. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2013. No. 1. pp. 29-39. (In Russ.)
9. Gersevanov N.M. Application of mathematical logic to the calculation of structures. Moscow. ONTI. 1923. 334 p. (In Russ.)
10. Guzeev R.N. Algorithm for generation of synthetic accelerograms from the condition of maximum coincidence of the response spectrum and the normative dynamic curve. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2009. No. 10. pp. 17-19. (In Russ.)
11. Davydova G.V., Ogneva S.V., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Generation of computational accelerograms for seismic risk assessment. Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2011. No. 4. pp. 42-47. (In Russ.)
12. Dolgaya A.A. Modeling of seismic action by a short time process. E-I. VNIINTPI. Ser. Earthquake Engineering. 1994. Issue. 5-6. pp. 56-63. (In Russ.)
13. Dolgaya A.A., Sibul G.A., Prokopovich S.V., Uzdin A.M. Energy characteristic of the force of seismic action. Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2020. No. 2. Issue 45. pp. 17-23. (In Russ.)
14. Dolgaya A.A., Nesterova O.P., Prokopovich S.V., Uzdin A.M., Chang Yuan, Guan et al. Modeling of seismic effects for dynamic calculation of buildings and structures. Russian-Chinese scientific journal "Commonwealth". 2017. No. 20. Part 1. pp. 59-66. (In Russ.)
15. Kurbatsky E.N. Fourier Spectra and Earthquake Response Spectra: Theory and Application. Moscow, Srosexpertziza, 2018. 155 p. (In Russ.)
16. Perelmuter A.V., Slivker V.I. Calculation models of structures and the possibility of their analysis. Kyiv, Steel. 2002. 600 p. (In Russ.)
17. Rutman Yu. L., Simbort E. Analysis of the possibilities of using the CAV energy criterion for calculating the seismic resistance of a structure. In: IX All-Ukrainian Sc. and Tech. conf. Const. in seismic regions of Ukraine. Kyiv, DP NDIBK. 2012a. pp. 618-625. (In Russ.)
18. Rutman Yu. L. Analysis of the loading of a structure based on the value of the energy criterion of the earthquake intensity. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2012b. No. 2. pp. 61-63. (In Russ.)
19. Rutman Yu.L., Shiwua A.J. Evaluation of the seismic energy absorbed by elasto-plastic system with a single degree of freedom. Bulletin of Civil Engineers. 2015. No. 2. Issue 49. pp. 64-74. (In Russ.)

20. Savinov O.A. Seismogenic ruptures and seismic hazard assessment at large dam construction sites. In: Proceedings Seismotectonics of the southern regions of the USSR. Moscow, Nauka. 1978. pp. 121-126. (In Russ.)
21. Savinov O.A., Uzdin A.M. On the consideration of soil conditions in the calculations for the seismic resistance of large engineering structures. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 1979. No. 6. pp. 61-65. (In Russ.)
22. Smirnova L.N., Uzdin A.M., Prokopovich S.V. Some features of simulation of computational accelerograms. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2019. No. 1. pp. 33-41. (In Russ.)
23. Tkachenko A.M., Nesterova O.P., Dolgaya A.A., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Seismic zoning maps in physical value— myth or reality. In: Book of abstracts of X intl. Conf. Prob. of the str. of mat. and str. in transport, May 23-25, 2017 Saint Petersburg, FGBOU VO PGUPS, 2017. 112 pp., pp. 77-79 (In Russ.)
24. Tyapin A.G. Response spectra and Fourier spectra: do we have the link between them? Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2020. No. 6. Issue 49. pp. 47-50. (In Russ.)
25. Tyapin A.G. Modern regulatory approaches to the calculation of critical structures for seismic effects. Moscow, DIA. 2018. 517 p. (In Russ.)
26. Uzdin A.M., Elizarov S.V., Belash T.A. Seismic-resistant structures of transport buildings and structures. Educational and methodological center for education in railway transport. Moscow. 2012. 501 p. (In Russ.)
27. Uzdin A.M. Universal energy characteristic of an earthquake. Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2018a. No. 3. pp. 23-26. (In Russ.)
28. Ulomov V.I., Bogdanov M.I. A new set of the seismic zoning maps of the Russian Federation (GSZ-2012). Engineering Survey. 2013. No. 8. pp. 30-39. (In Russ.)
29. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (18A00716). Ministero Delle Infrastrutture e Dei Trasporti. Decreto 17 Gennaio 2018. Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 42 del 20 febbraio 2018. Serie generale. 2018. No. 8. 372 p.
30. Bogdanova G.A., Dolgaya A.A., Ivanova J. V, Sakharov O.A., Uzdin A.M. The model of seismic impact as a short temporary process for calculating of the seismoisolated systems. In: 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1358, New Zealand, 2000.
31. Dmitrovskaya L.N., Uzdin A.M. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales. In: First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006. Paper Number: 32
32. Dowric D.J. Earthquake resistant Design for Engineers and architects. New York: John Wiley & Sons, 1977.
33. Erberik M.A., Sucuoglu H. Energy-based low-cycle fatigue characteristics of degrading structures. In: Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 118.2000.
34. Faccioli E., Paolucci R., Rey J. Displacement Spectra for Long Periods. Earthquake spectra. 2004. Vol. 20. No. 2. pp. 347-376.
35. Campbell K. W., Bozorgnia Y. Cumulative Absolute Velocity (CAV) and Seismic Intensity Based on the PEER-NGA Database. Earthquake Spectra. 2012. Vol. 28. No. 2. pp. 457-485.
36. Koliopoulos P.K., Margaris B.N., Klimis N.S. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. J. of Earthq. Eng. 1998. Vol. 2. No. 3. pp. 391-417.
37. Micov V.S., Petrovski J. T. Dynamic response and performance evaluation of multi-span highway bridges with displacement control. In: Proc. of 12th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 197. 2000.
38. Park R., Paulay T. Reinforced Concrete Structures. New York, John Wiley & Sons, 1975.
39. Ulomov V.I. and the Working Group of the GSHAP Region 7. Seismic hazard of Northern Eurasia. Annali Geofis. 1999. Vol. 42. pp. 1023-1038.

40. Uzdin A.M., Prokopovich S.V. Some principles of generating seismic input for calculating structures. In: E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 157. 0602. KTTI-2019. DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021

41. Uzdin A. M., Dmitrovskaya L. N., Sakharov O. A. Setting the Level of Design Acceleration on the Basis of the Energy Theory of Earthquake Engineering. In: Fourteen European Conference on Earthquake Engineering, Macedonia, Ochrid. 2010, CD-paper № 189, Abstract Book. p. 98.

42. Zaslavsky Y., Shapira A., and Kenigsberg M. Earthquake site response study for designed bridges in Israel. In: The proceedings of the 12-th European conference on earthquake engineering (12th ECEE), 9-13 September 2002, Barbican Centre, London, UK; Paper reference 059.

УДК 550.34

DOI: [10.46698/VNC.2022.45.59.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.45.59.004)

Оригинальная статья

Некоторые предварительные данные о спектрах колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей

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: 10.08.2022, доработана: 07.09.2022, одобрена в печать: 14.09.2022

Резюме: Актуальность работы. Тема учета влияния локальных грунтово-геоморфологических условий традиционно является одной из основных в оценках сейсмической опасности территорий. Однако несмотря на успехи, достигнутые в данной области, здесь еще остаются вопросы, требующие дальнейшего уточнения. Так, например, российскими нормативами рекомендуется производить вышеозначенный учет путем введения в расчеты некоторой поправки, которая для данного грунта является постоянной величиной, не зависящей от величины и удаленности воздействующих на данный грунт землетрясений. В то же время результаты ряда эмпирических и теоретических данных показывают, что реакция одного и того же грунта может меняться при изменении характеристик воздействующих на него сейсмических возмущений. Такое положение дел объясняется тем, что на практике (особенно при вероятностных расчетах, когда оценивается кумулятивный эффект большого количества отдельных воздействий, характеристики каждого из которых обычно невозможно прогнозировать с необходимой точностью) эти, в принципе имеющиеся возможности трудно реализовать в полном объеме. В данном контексте настоящая работа, направленная на получение новых данных о сейсмической реакции грунтов, представляется актуальной. **Цель исследования.** Изучение изменчивости реакции разных типов грунтов в зависимости от характера воздействующих на них сейсмических колебаний и на этой базе разработка более точного и в то же время удобного для практического применения способа количественного учета влияния местных грунтовых условий при прогнозировании (в том числе вероятностном) возможных в данном месте сейсмических воздействий. **Методы исследования.** В работе использован представительный материал – 2362 спектра колебаний «мягких» и 1021 «твердых» грунтов, зарегистрированных в различных районах мира при землетрясениях с магнитудами 2,5–7,3 на расстояниях 1–658 км. С использованием методов математической статистики отдельно рассмотрены зависимости уровней спектральной плотности Фурье ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов от магнитуды землетрясения, расстояния до очага и частоты спектральной составляющей. **Результаты работы.** Получены новые эмпирические данные об особенностях сейсмических колебаний разных типов грунтов существенно отличающиеся от подобных оценок, применяющихся в ряде отечественных и зарубежных инженерно-сейсмологических практик (при сейсмическом микрорайонировании, уточнении сейсмичности для отдельных объектов и др.), практическое использование которых может корректировать получаемые традиционными способами результаты. Изучение вопроса о том, как именно и в какой мере применение этих новых данных может повлиять на вышеуказанные прогнозные (особенно вероятностные) оценки в различных сейсмогеологических условиях представляется основным в продолжении исследований по данной тематике.

Ключевые слова: сейсмические свойства «мягких» и «твердых» грунтов, спектры ускорения колебаний грунта, сейсмическое микрорайонирование, сильные землетрясения.

Для цитирования: Чернов Ю. К. Некоторые предварительные данные о спектрах колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 61–78. DOI: [10.46698/VNC.2022.45.59.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.45.59.004).

GEOPHYSICS

[DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.45.59.004)

Original paper

Some preliminary data on the vibration spectra of «soft» and «hard» soils during earthquakes of different magnitudes and distances

Yu. K. Chernov 

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

Received: 10.08.2022, revised: 07.09.2022, accepted: 14.09.2022

Abstract: Relevance. The topic of the influence of local soil-geomorphological conditions` consideration is traditionally one of the main ones in the seismic hazard of territory estimation. However, despite the progress made in this area, there are still issues that require further clarification. Thus, Russian standards recommend carrying out the above consideration by introducing into the calculations a certain correction, which for a given soil is a constant value that does not depend on the magnitude and distance of earthquakes affecting this soil. At the same time, the results of a number of empirical and theoretical data show that the response of the same soil can change when the characteristics of seismic disturbances affecting it change. This is explained by the fact that these, in principle, available opportunities are difficult to realize fully in practice (especially in probabilistic calculations, when the cumulative effect of numerous individual impacts, the characteristics of each of which are usually impossible to predict with the required accuracy, is estimated). In this context, this work aimed at obtaining new data on the seismic response of soils seems to be relevant. **Aim.** The aim of the work is the study of the variability of different types of soils response depending on the nature of seismic vibrations affecting them and the development, on this basis, of a more accurate and at the same time convenient for practical application method for quantitative consideration of local soil conditions influence in the prediction (including probabilistic prediction) of possible seismic impacts in a given place. **Methods.** Representative material was used in the work – 2362 and 1021 vibration spectra of “soft” and “hard” soils respectively, recorded in various regions of the world during earthquakes with magnitudes of 2.5-7.3 at distances of 1-658 km. Using the methods of mathematical statistics, the dependences of the levels of the Fourier spectral density of the accelerations of “soft” and “hard” soils vibrations on the earthquake magnitude, the distance to the source, and the frequency of the spectral component are considered separately. **Results.** New empirical data on the features of seismic vibrations of different types of soils have been obtained. These data differs significantly from similar estimates used in a number of domestic and foreign engineering and seismological practices (during seismic microzonation, seismicity refinement for individual objects, etc.). The practical use of such data can correct the results obtained by traditional methods. The study of how exactly and to what extent the application of these new data can affect the above predictive (especially probabilistic) estimates under various seismogeological conditions seems to be the main one in ongoing research on this topic.

Keywords: seismic properties of “soft” and “hard” soils, acceleration spectra of ground vibration, seismic microzonation, strong earthquakes.

For citation: Chernov Yu. K. Some preliminary data on the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes of different magnitudes and distances. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 61-78. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004.

Введение

Среди природных факторов, влияющих на характер возможных в данном месте сейсмических воздействий, важную роль играют местные инженерно-геологиче-

ские условия. Поэтому уже многие десятилетия во всем мире по данной проблематике проводятся исследования и разрабатываются соответствующие нормативно-методические документы. К настоящему времени в данном направлении достигнуты значительные успехи, решены многие важные задачи. В то же время здесь еще остаются вопросы, которые требуют дальнейшего рассмотрения и уточнения. Один из них – это способы количественного учета влияния местных грунтово-геоморфологических условий при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий. Так, например, пока традиционно в большинстве отечественных исследований (а также, например, в последней версии российских нормативов по сейсмическому микрорайонированию (СМР)) при оценке влияния грунтов на возможное сейсмическое воздействие это влияние («грунтовая» поправка) вводится в расчеты как некая константа, независящая от удаленности и магнитуды землетрясения (см., например, [Заалишвили и др., 2018]). В то же время результаты ряда эмпирических наблюдений (см., например, [Чернов, 1989; Джурик и др., 2011]) показывают, что реакция одного и того же грунта может меняться при изменении характеристик воздействующих на него сейсмических возмущений. Теоретические расчеты, вообще однозначно указывают на зависимость, например, спектральных характеристик одного и того же грунтового разреза от интенсивности падающих на его подошву сигналов, от углов подхода сейсмических волн, геометрии грунтовых слоев и др. (см., например, [Штейнберг и др., 1993; Заалишвили и др., 2022]). Другое дело, что на практике (особенно при вероятностных расчетах, когда оценивается кумулятивный эффект большого количества отдельных воздействий, характеристики каждого из которых обычно невозможно прогнозировать с необходимой точностью) эти, в принципе имеющиеся возможности модельных расчетов, затруднительно реализовать в полном объеме.

В данном контексте представляется актуальной задача дополнительного изучения возможности разработки более адекватного и в то же время удобного для практического применения способа количественного учета влияния местных грунтовых условий при прогнозировании (в том числе вероятностном) возможных в данном месте сейсмических воздействий.

Исходя из изложенного цель настоящего исследования – изучение изменчивости реакции разных типов грунтов в зависимости от характера воздействующих на них сейсмических колебаний.

Методика исследований

В настоящем исследовании в качестве исходных привлечены данные об амплитудных спектрах Фурье ускорений колебаний грунта, рассчитанных по акселерограммам, а также велосиграммам и сейсмограммам колебаний грунта, зарегистрированным при реальных землетрясениях в различных сейсмоактивных районах мира. Краткая характеристика этих данных приведена в таблице 1.

Как видно из этой таблицы в выборку включены записи землетрясений с широким разбросом по магнитудам, удаленностям и региональным сеймотектоническим условиям. Это сделано для того, чтобы сформировать некоторую «среднестатистическую» выборку, которая бы, по возможности, учитывала и, соответственно, на выходе нивелировала различные обстоятельства возникновения землетрясений, которые могут влиять на рассматриваемое явление, как таковое. Ограничением является то, что здесь рассматриваются неглубокие (глубина очагов до 30-40 км) зем-

летрясения, и те, для которых имеются сведения о грунтовых условиях в пункте регистрации. Большая часть записей слабых и умеренных из указанные в таблице 1 землетрясений заимствованы из материалов исследований, в разное время проведенных ИС АН Узбекистана, ИФЗ РАН, ИМГиГ ДВО РАН (см. [Рустанович, 1974; Дагестанское..., 1981; Адылов и др., 1988; Чернов, 1989; Газлийские землетрясения..., 1986; Геодинамика..., 1997; Чернов и др., 2019]. По более сильным землетрясениям исходные данные взяты из баз сильных движений (Strong-Motion Virtual Data Center (VDC); European Strong-Motion Database (ESD)), а также из публикаций [Strong-motion..., 1975-1979; Analysis..., 1969-1976; Bull. of international..., 1978; Bull. of strong-motion..., 1984; San-Fernando..., 1973; Porcella et al., 1982; Preliminary..., 1979; The Northridge..., 1994].

Таблица 1 / Table 1

Характеристики используемых данных по инструментальной регистрации землетрясений с оценками спектров Фурье / Characteristics of the used data on instrumental registration of earthquakes with estimates of the Fourier spectra

Регион; зарегистрированные характеристики колебаний грунта / Region; recorded characteristics of ground vibration	«Мягкий» грунт / “Soft” soil			«Твердый» грунт / “Hard” soil		
	Магнитуды / Magnitudes	Расстояния (км) / Distances (km)	Количество спектров / Number of spectra	Магнитуды / Magnitudes	Расстояния (км) / Distances (km)	Количество спектров / Number of spectra
Азорские острова; ускорения / Azores; accelerations	5,0	5	2	-	-	-
Дагестан; смещения, скорости / Dagestan; displacements, velocities	2,5-4,7	3-32	56	2,5-5,0	3-26	49
Дальний Восток; скорости, ускорения / Far East; velocities, accelerations	2,5-7,2	4-413	84	4,0	21	2
Запад США; ускорения / US West; accelerations	4,7-6,9	4-350	52	5,0-6,7	8-403	10
Индия; ускорения / India; accelerations	-	-	-	4,5-7,1	14-153	52
Иран; ускорения / Iran; accelerations	6,0-7,3	5-70	14	-	-	-
Кавказ; смещения, скорости, ускорения / Caucasus; displacements, velocities, accelerations	7,0	40	2	3,0-5,5	5-25	14
Калифорния; ускорения / California; accelerations	4,2-7,2	2-598	1468	2,5-7,1	1-268	549
Курильские острова; скорости / Kuril Islands; velocities	3,6-6,6	37-340	94	-	-	-

Новая Зеландия; ускорения / New Zealand; accelerations	5,1-5,8	11-672	74	4,8-7,1	10-672	290
Тайвань; ускорения / Taiwan; accelerations	7,3	2-23	48	7,3	4-10	12
Туркменистан; смещения / Turkmenistan; displacements	-	-	-	3,3-4,0	5-15	8
Турция; ускорения / Turkey; accelerations	6,8	2	2	-	-	-
Узбекистан; смещения, скорости, ускорения / Uzbekistan; displacements, velocities, accelerations	2,5-7,3	8-45	324	4,5-4,8	18-42	4
Юг Европы, ускорения / South of Europe; accelerations	3,3-7,0	7-245	128	3,8-6,5	6-240	21
Япония; ускорения / Japan; accelerations	6,9	1-10	14	6,9	2-7	10
Всего: смещения, скорости, ускорения / In total: displacements, velocities, accelerations	2,5-7,3	1-598	2362	2,5-7,3	1-672	1021

Спектры из таблицы 1 разделены на две группы, различающиеся типом грунта в месте регистрации. Первая группа – это спектры, зарегистрированные на грунтах, которые объединены под названием «мягкие» грунты. Это неплотные глины, суглинки, супеси, пески разной степени плотности и влажности, слабосцементированные галечники, лессы, сильно выветрелые скальные и полускальные породы, а также грунты, которые в первоисточниках называются «аллювиум». Грунты данной группы предположительно могут быть отнесены к грунтам II категории СНиП по сейсмическим свойствам. Вторая группа – это спектры, зарегистрированные на песчаниках, известняках, сланцах, гнейсах, конгломератах, плотных глинах, хорошо сцементированных галечниках, породах вулканического и магматического происхождения, которые объединены под названием «твердые» грунты. Эти грунты можно отнести к грунтам I категории СНиП по сейсмическим свойствам.

Разделение всего массива данных из таблицы 1 на вышеописанные две группы, является достаточно грубым и не учитывающим возможное влияние других факторов. Однако корректный учет этих факторов потребовал бы многократного увеличения статистики используемых записей землетрясений. Поэтому в данном исследовании сделан пока первый шаг в данном направлении – производится сравнение спектров по одному относительно явному показателю – по степени прочности грунтов, играющей существенную роль в формировании реакции этих грунтов на входящее сейсмическое воздействие.

В первоисточниках при описании землетрясений, приводятся разные оценки магнитуд землетрясений (по поверхностным и объемным волнам, моментные и локальные магнитуды), которые в численном выражении часто не совпадают. В данном исследовании эти различные определения магнитуд объединены под общим

показателем, считая, что данные различия носят несистемный (случайный) характер.

В первоисточниках приведены также различные по физическому смыслу расстояния, на которых зарегистрированы спектры – «расстояния до разрыва», а также гипоцентральные и реже эпицентральные расстояния. В настоящем исследовании в качестве меры удаленности точки регистрации спектра от источника сейсмических возмущений, как имеющие ясный физический смысл, приняты «расстояния до очага землетрясения», к которым приведены данные первоисточников. При этом «расстояния до разрыва» приравнены к «расстояниям до очага», а в гипоцентральные и эпицентральные расстояния в соответствии с процедурами, подробно описанными в [Чернов и др., 2019] введены корректирующие поправки.

Полученные вышеописанным способом массивы спектров для «мягких» и «твердых» грунтов разделены по величине (магнитуде) землетрясений. Некоторые характеристики итоговых массивов данных сведены в таблицу 2.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики сформированных итоговых массивов данных по инструментальной регистрации землетрясений с оценками спектров Фурье / Characteristics of the formed resulting datasets based on the instrumental registration of earthquakes with estimates of the Fourier spectra

«Мягкие» грунты / “Soft” soil			«Твердые» грунты / “Hard” soil		
Магнитуды землетрясений / Earthquakes magnitudes	Расстояния до очага (км) / Distances to the source (km)	Количество спектров / Number of spectra	Магнитуды землетрясений / Earthquakes magnitudes	Расстояния до очага (км) / Distances to the source (km)	Количество спектров / Number of spectra
7 (6,5-7,3)	0,5-584	1045	7 (6,5-7,3)	0,5-658	305
6 (5,5-6,4)	0,5-405	612	6 (5,5-6,4)	0,5-423	331
5 (4,5-5,4)	0,5-201	271	5 (4,5-5,4)	1-248	224
4 (3,5-4,4)	0,5-148	271	4 (3,5-4,4)	0,5-26	100
3 (2,5-3,4)	2-38	163	3 (2,5-3,4)	2-15	61

Спектры, первоначально рассчитанные по записям скоростей или смещений колебаний грунта пересчитаны в спектры ускорений путем стандартной процедуры умножения первоначальных значений ($|S|(f)$), зарегистрированных на частоте (f), на величину $(2\pi f)$ или $(2\pi f)^2$, соответственно.

В соответствие с концепцией данных исследований, предполагается, что общие различия между спектрами колебаний «твердых» и «мягких» грунтов носят не случайный характер. Различия же, наблюдаемые внутри каждой из этих двух групп спектров (при одинаковых магнитудах и удаленностях землетрясений), случайны. Оценки параметров функций распределения вероятностей этих случайных величин и соответствующих аппроксимирующих выражений произведены с использованием методов корреляционного, регрессионного, дисперсионного и других стандартных методов статистического анализа.

Для удобства расчетов так же, как в [Чернов, 1989] оригинальные спектры Фурье параметризованы, т. е. представлены в разряженном виде – в виде дискретного набора значений $|S|(f)$ для 18 спектральных составляющих логарифмически равно-

мерно распределенных по частоте в диапазоне 0,28-22 Гц. В этой же работе изложены основания, по которым принято, что значения $|S| (f)$ как для «мягких», так и «твердых» грунтов – случайные величины, имеющие логнормальное распределение во всем рассматриваемом диапазоне M , D и f .

Результаты работы и их обсуждение

На рисунке 1 в графическом виде приведены примеры итоговых массивов значений $|S| (f)$, принятых для «мягких» и «твердых» грунтов при различных M , D и f . При построении этих графиков в целях общего сглаживания выборки из общего массива данных исключены немногочисленные экстремальные выбросы значений $|S|$ на отдельных частотах спектров, к которым (с учетом обычно встречающихся стандартных отклонений величины $\lg|S|$ при заданных M , D и f порядка 0,25) отнесены значения $|S|$, отличающиеся от среднего в большую или меньшую сторону более чем в 4 раза.

Несмотря на наблюдаемый разброс отдельных значений $|S| (M, D, f)$, несколько затушевывающий общую картину, из приведенных примеров видно, что уровни спектров «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях одних и тех же маг-

ab

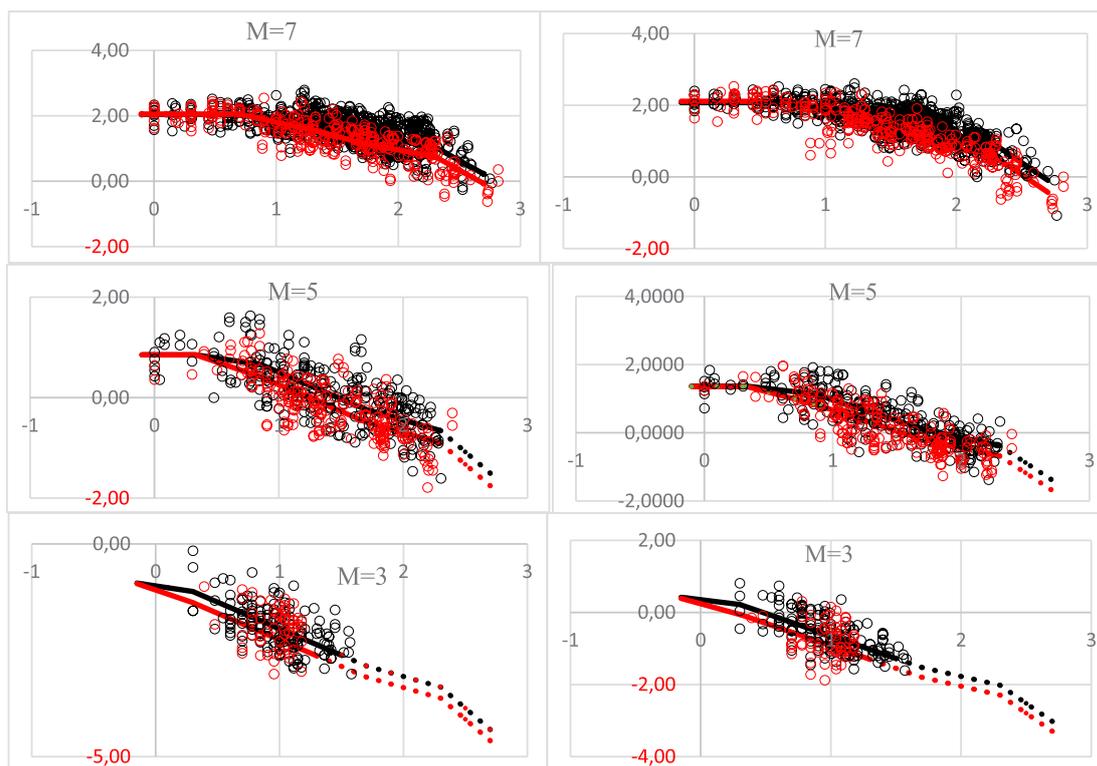


Рис. 1. Примеры значений $\lg|S|$ ($|S|$ в см/с – ось ординат); черный и красный цвет – «мягкий и «твердый» грунт, соответственно для $f= 0,47$ Гц (а) и 13 Гц (б) при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей ($\lg D$ в км – ось абсцисс). Пустые кружки – отдельные измерения, линии – аппроксимирующие кривые. Сплошные линии – реальные данные, пунктир – экстраполяции

Fig. 1. Examples of the values of $\lg|S|$ ($|S|$, in cm/s, is the ordinate axis); black and red colors denote “soft” and “hard” ground, respectively, for $f= 0.47$ Hz (a) and 13 Hz (b) during earthquakes of different magnitudes and distances ($\lg D$, in km, is the abscissa axis). Empty circles are individual measurements; lines are approximating curves. Solid lines are real data; dotted lines are extrapolations

нитуд в общем различны. И различия эти неодинаковы на различных расстояниях от очага. Кроме того, они меняются в зависимости от магнитуды землетрясений и частот спектральных составляющих. Более отчетливо эти тенденции видны при рассмотрении не индивидуальных оценок спектров при разных значениях M , D , f , а средних значений S (M , f), рассчитанных для отдельных интервалов значений lgD , на которые с шагом 0,2 лог. единицы разбит рассматриваемый диапазон расстояний до очага землетрясения (D). Примеры таких построений приведены на рисунке 2.

В процессе дальнейшего анализа по сформированным выборкам произведены аппроксимации в виде аналитических выражений. За основу этих аппроксимаций взята общая структура аналитических выражений, полученная в результате разработки моделей сильных движений, описанная в [Чернов и др., 2019]. Принято, что искомые функции затухания спектров как «мягких», так и «твердых» грунтов с расстоянием $|S|$ (M , D , f) во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд землетрясений состоят из отдельных участков, которые характеризуются своими коэффициентами затухания с расстоянием. По мере удаления от очага землетрясения первой наблюдается так называемая ближняя зона, затем идет переходная зона от ближней зоны к дальней зоне, далее следует дальняя зона, состоящая из трех подзон – сначала идет собственно дальняя зона, затем следует первая подзона, в которой скорость затухания уровней спектров с расстоянием замедляется по сравнению с собственно дальней зоной, после которой, начиная с некоторых расстояний скорость затухания с расстоянием уровней спектров вновь возрастает – это вторая самая удаленная от очага подзона дальней зоны. Конкретные параметры аппроксимирующих выражений (моделирующих колебания «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разной величины и удаленности) также как в [Чернов и др., 2019] определялись методом подбора с тем условием, чтобы данные модели оптимальным образом описы-

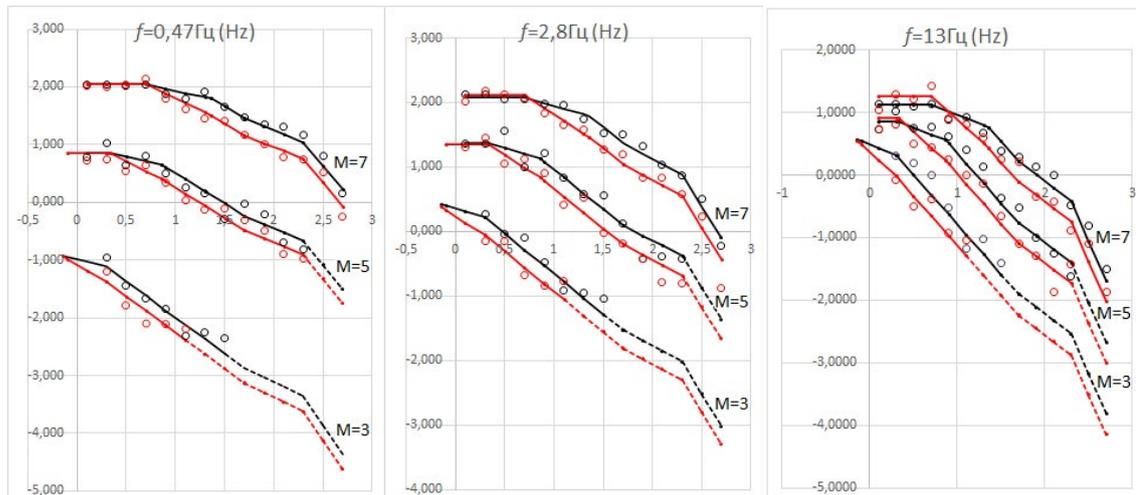


Рис. 2. Примеры значений $lg|S|$ (S в см/с – ось ординат) зарегистрированных на «мягких» (черный цвет) и «твердых» (красный цвет) грунтах на различных частотах при землетрясениях разных магнитуд на различных расстояниях до очага (lgD в км – ось абсцисс). Пустые кружки – поинтервальные средние значения, линии – аппроксимирующие кривые. Сплошные линии – реальные данные, пунктир – экстраполяции /

Fig. 2. Examples of $lg|S|$ (S , in cm/s, is the ordinate axis) recorded on “soft” (black color) and “hard” (red color) soils at different frequencies during earthquakes of different magnitudes at different distances to the source (lgD , in km, is the abscissa axis). Empty circles are interval mean values; lines are approximating curves. Solid lines are real data; dotted lines are extrapolations

вали весь объем данных во всех рассматриваемых диапазонах изменения величин M , D и f .

Важным элементом данных построений является определение уровней спектров Фурье $|S|(M, f)$ в ближних зонах землетрясений и определение размеров самих этих ближних зон. Размеры ближних зон землетрясений всех рассматриваемых магнитуд в соответствии с рекомендациями работы [Чернов и др., 2019] определены по участкам слабого изменения уровней спектров по мере приближения к очагу землетрясения. Эти зоны достаточно отчетливо видны на соответствующих графиках, приведенных на рисунках 1 и 2. Размеры этих зон (т. е. $D = r_0'$) в пределах точности измерений одинаковы для функций $|S|(M, D, f)$ как «мягких», так и «твердых» грунтов и не зависят также от частоты спектральной составляющей. Они зависят только от магнитуды землетрясения. Эту зависимость можно описать выражениями:

$$\begin{aligned} \lg r_0' &= 0,185 M - 0,595 && \text{для } M \geq 4,5 \\ \lg r_0' &= 0,258 M - 0,925 && \text{для } M \leq 4,5 \end{aligned} \quad (1)$$

где r_0' – в км.

Согласно выражениям (1) в дальнейших построениях для землетрясений с $M = 7, 6, 5, 4$ и 3 приняты размеры ближних зон 5 км, 3,3 км, 2,1 км, 1,3 км и 0,7 км, соответственно. Эти оценки несколько отличаются от аналогичных оценок, полученных в [Чернов и др., 2019] для «среднестатистических» грунтов. Однако различия эти незначительны и могут объясняться погрешностями самих статистических построений. Главным, на наш взгляд, в данном случае является то, что результаты независимых оценок, полученные по трем различным выборкам (для «мягких», «твердых» и «среднестатистических» грунтов), оказались достаточно близкими и не зависящими от типов сравниваемых грунтов. Это свидетельствует об устойчивости и, соответственно, реалистичности данного вида оценок.

Далее, в соответствие с результатами наших предыдущих исследований (см. [Чернов, 1989; Чернов и др., 2019]) принято, что в ближней зоне землетрясений разных магнитуд средняя скорость изменения величины $\overline{\lg|S|}(M, f)$ на фиксированных частотах при изменении магнитуды землетрясения ($\beta_M = D \overline{\lg|S|} / DM$) может быть описана линейной зависимостью. Статистический анализ зарегистрированных на расстояниях $D \leq r_0'$ значений $|S|(M, f)$ показывает, что эта зависимость несколько различается для спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов. В аналитическом виде эти зависимости могут быть представлены выражениями:

$$\begin{aligned} \overline{\beta_M} &= -0,367 \lg f + 0,547 && \text{для «мягких» грунтов} \\ \overline{\beta_M} &= -0,345 \lg f + 0,559 && \text{для «твердых» грунтов} \end{aligned} \quad (2)$$

где f – частота в Гц.

Сравнивая выражения (2) с аналогичными определениями [Чернов и др., 2019] можно видеть, что, как и в случае определений r_0' , оценки $\overline{\beta_M}(f)$ близки и как бы подтверждают друг друга. Это тест на внутреннюю согласованность полученных результатов. Второе важное обстоятельство – это то, что данные оценки хорошо вписываются в выполненные ранее отдельные определения зависимостей $\beta_M(f)$ для землетрясений взбросового и сдвигового типов [Чернов, 1989]. Так, по скорости изменения величины $\overline{\beta_M}$ при изменении f выражения (2) занимают промежу-

точное положение между землетрясениями «сдвигами» и «взбросами», для которых эти величины варьируют в пределах 0,29-0,33 и 0,40-0,48, соответственно. В нашем случае наблюдается некоторый сдвиг значений β_M в сторону «сдвиговых» землетрясений, что коррелирует с исходными данными (см. таблицу 1), согласно которым большинство используемых спектров зарегистрировано в районах, в которых происходят землетрясения с преобладанием сдвиговой составляющей подвижки в очаге. Таким образом, полученные соотношения (2) показывают и хорошую внешнюю согласованность.

На следующем этапе посредством введения поправочных коэффициентов k_β , учитывающих уменьшение b_M при росте M (см. [Чернов и др., 2019] полученные «средние» значения $\beta_M(f)$ преобразованы в окончательный вид $\beta_M(f) = k_\beta \beta_M(f)$.

Значения $b_M(f)$ дают оценки значений $\lg|S|(M, f)$ относительно некоторой «точки отсчета». За такую «точку отсчета» приняты «средневзвешенные» спектры, рассчитанные для «средневзвешенных» землетрясений. При расчете таких «средневзвешенных» землетрясений статистические веса принимались пропорциональными доли землетрясений данной магнитуды в общей выборке (см. таблицу 2). Для спектров колебаний на «мягких» грунтах такое «средневзвешенное» землетрясение имеет магнитуду $M=5,9$, для спектров колебаний на «твердых» грунтах – магнитуду $M=5,7$. Для этих «средневзвешенных» землетрясений по имеющимся массивам данных таким же способом определены соответствующие «средневзвешенные» спектры колебаний (средневзвешенные значения $\lg|S|(M, f)$). Эти «средневзвешенные» спектры для землетрясений «средневзвешенных» магнитуд затем, посредством вышеописанных соотношений $\beta_M(f)$, пересчитаны на другие рассматриваемые в данном исследовании магнитуды землетрясений. В графическом виде примеры результатов этих построений приведены на рисунке 3.

Сравнивая средние значения между полученными спектрами ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов в ближних зонах землетрясений с $M=7-3$ с

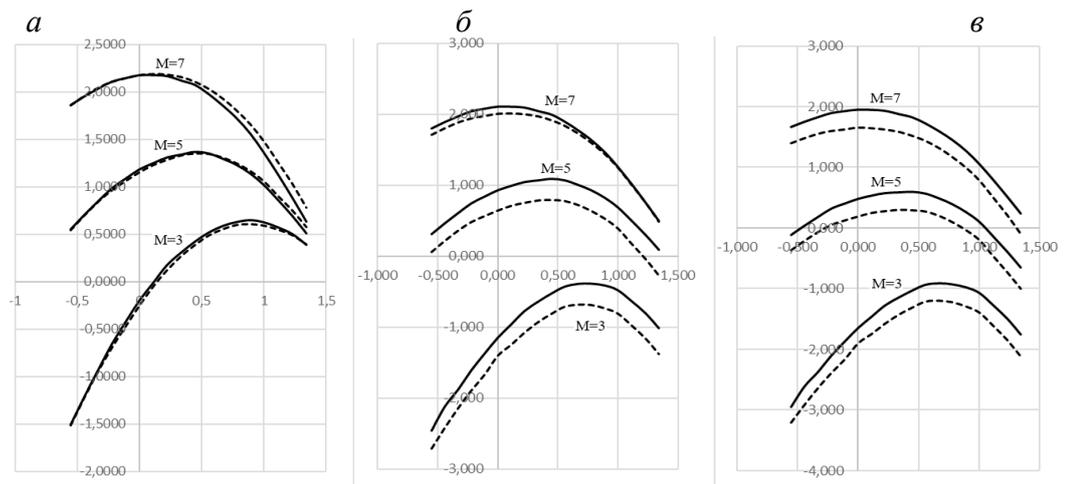


Рис. 3. Примеры наиболее вероятных значений спектральной плотности Фурье ускорений колебаний «мягких» (сплошная линия) и «твердых» (пунктирная линия) грунтов при землетрясениях разных магнитуд (M) на расстояниях до очага 1,0, 12,6 и 20,0 км (индексы а, б, в, соответственно). Ось ординат – $\lg|S|$ в см/с; ось абсцисс – $\lg f$ в Гц /

Fig. 3. Examples of the most probable values of the Fourier spectral density of vibration accelerations of “soft” (solid line) and “hard” (dotted line) soils during earthquakes of different magnitudes (M) at distances to the source of 1.0, 12.6 and 20.0 km (indices a, b, c, respectively). The ordinate axis is $\lg|S|$ in cm/s; the abscissa axis is $\lg f$ in Hz

такими же оценками для ближних зон «среднестатистических» спектров (см., например, [Чернов, 1989; Чернов и др., 2019]) можно видеть, что спектры настоящего исследования несколько отличаются от «среднестатистических» оценок. Наибольшие различия наблюдаются в спектрах с $M = 7$, где спектры настоящего исследования в среднем на 0,09 лог. единицы ниже «среднестатистических» спектров. По мере понижения магнитуды землетрясений эта разница уменьшается до величины $-0,01$ лог. единицы при $M = 3$. Принимая во внимание, что стандартные отклонения уровней $\lg|S|$ при заданных M, D, f по данным разных исследований обычно составляют 0,2-0,3, можно считать, что наши оценки достаточно хорошо согласуются с результатами предыдущих работ.

Согласно принятой структуре функций затухания спектров с расстоянием (см. выше) по мере увеличения D после ближней зоны следует переходная или промежуточная зона. Ее размеры (т. е. $D = r_0$) также как и размеры ближней зоны (r_0') зависят от магнитуды землетрясения. Эти зависимости, определенные по описанным выше исходным данным, оказались одинаковыми (в пределах точности построений) для «мягких» и «твердых» грунтов. Их можно представить выражениями:

$$\begin{aligned} \lg r_0 &= 0,250M - 0,391 && \text{для } M \geq 4,5 \\ \lg r_0 &= 0,290M - 0,569 && \text{для } M \leq 4,5 \end{aligned} \quad (3)$$

где r_0 – в км.

Согласно данным выражениям, переходные или промежуточные зоны распространяются до расстояний $D = r_0 = 23$ км при $M = 7$, до $D = r_0 = 13$ км при $M = 6$, до $D = r_0 = 7,2$ км при $M = 5$, до $D = r_0 = 3,9$ км при $M = 4$ и до $D = r_0 = 2$ км при $M = 3$. Также как значения r_0' величины r_0 в настоящем исследовании несколько отличаются от подобных определений, выполненных по другим выборкам (см., например, [Чернов и др., 2019]). Но эти различия незначительны и находятся в пределах погрешностей построений.

Коэффициенты затухания уровней спектров с расстоянием в переходных зонах (n^*) зависят от частоты и не зависят от магнитуды землетрясения и связаны с коэффициентами затухания в следующей за ней собственно дальней зоне (n) как $n^* = 0,349n$ для «мягких» грунтов и $n^* = 0,794n$ для «твердых» грунтов.

Собственно дальняя зона распространяется до расстояний $D = 50$ км независимо от магнитуды землетрясения. Значения коэффициентов затухания с расстоянием в этой зоне n в зависимости от частоты спектральной составляющей для частот $f \geq f_c$, (где f_c – угловая частота спектра по Дж. Бруну [1981]) описываются выражениями:

$$\begin{aligned} n &= -0,253 \lg f - 1,113 \text{ при } f < 3,6 \text{ Гц} \\ n &= -0,478 \lg f - 0,975 \text{ при } 3,6 \leq f \leq 10 \text{ Гц} \\ n &= -1,138 \lg f - 0,322 \text{ при } f > 10 \text{ Гц} \end{aligned} \quad (4)$$

где $n = D \lg|S| / D \lg D$.

На частотах $f < f_c$ затухание $n(f) = \text{const}$ и равно затуханию на частоте f_c .

Полученные коэффициенты $n(f)$, в графическом виде показаны на рисунке 4. Здесь же приведены сделанные ранее оценки для «среднестатистических» грунтов.

Из этого рисунка видно, что коэффициенты затухания с расстоянием для «мягких» и «твердых» грунтов в собственно дальней зоне и подзонах дальней зоны одинаковы. В пределах дальней зоны и первой подзоны дальней зоны не сильно отли-

чаются от них и коэффициенты затухания с расстоянием «среднестатистических» грунтов. Ситуация резко меняется в переходной зоне. Здесь коэффициенты n^* (f) для «твердых» грунтов значительно превышают по абсолютной величине относительно близкие между собой аналогичные коэффициенты для «мягких» и «среднестатистических» грунтов. Также значительные различия можно видеть между теперь уже близкими между собой коэффициентами затухания в первой подзоне дальней зоны n^{**} (f) = 0,659 n (f) и коэффициентами затухания во второй подзоне дальней зоны n^{***} (f) = 2 n (f) для «мягких» и «твердых» грунтов с одной стороны и такими же оценками для «среднестатистических» грунтов, с другой.

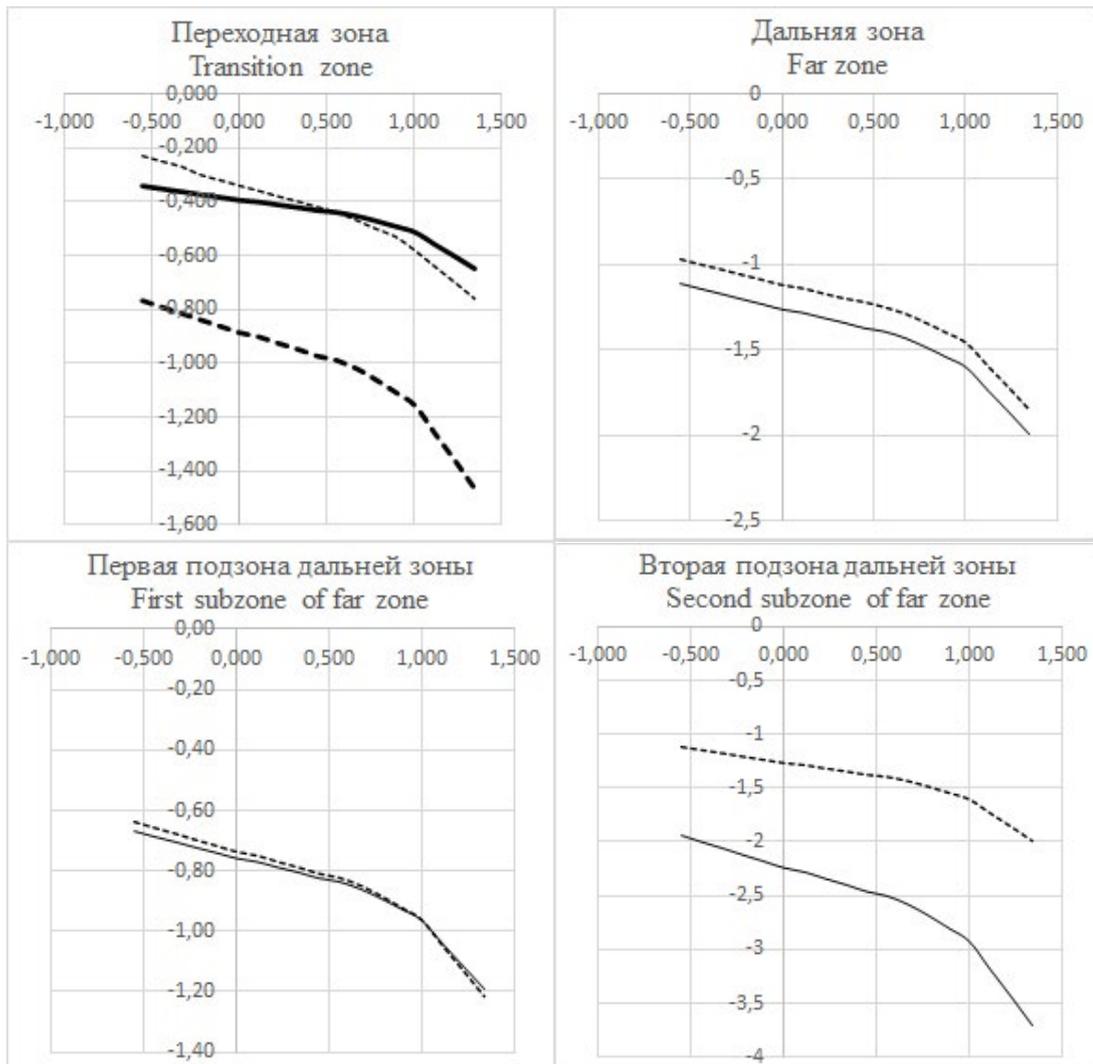


Рис. 4. Коэффициенты затухания с расстоянием наиболее вероятных уровней спектров ускорений колебаний «мягких» (толстая сплошная линия), «твердых» (толстая пунктирная линия), совместно «мягких» и «твердых» (тонкая сплошная линия) полученные по результатам настоящего исследования и «среднестатистических» грунтов из [Чернов и др., 2019] (тонкая пунктирная линия) – ось ординат, в зависимости от логарифма частоты спектральных составляющих ($\lg f$) – ось абсцисс, в зонах, расположенных на разных удалениях от очага /
 Fig. 4. Attenuation coefficients with the distance of the most probable levels of the vibration acceleration spectra of “soft” (thick solid line), “hard” (thick dotted line), jointly “soft” and “hard” (thin solid line) obtained from the results of this research and “average” soils from [Chernov et al., 2019] (thin dotted line) – the ordinate axis, depending on the logarithm of the frequency of spectral components ($\lg f$) – the abscissa axis, in zones located at different distances from the focus

Сходство между независимыми оценками коэффициентов затухания с расстояниями величин $lg|S| (f)$ для «мягких» и «среднестатистических» грунтов объясняется тем, что они описывают колебания грунтов с близкими инженерно-геологическими характеристиками (в большинстве случаев это грунты Пкатегории СНиП по сейсмическим свойствам). Различия же в коэффициентах затухания, в переходной и второй подзоне дальней зоны, по-видимому, имеют разную природу. Если в случае далеких землетрясений может сказываться немногочисленность самих выборок и, как следствие, большая погрешность определения трендов, то в близких к очагу переходных зонах, где статистика многочисленнее, вероятно, имеет место влияние именно «грунтового» фактора.

Рассматривая результаты проведенного исследования в целом, можно видеть, что полученные функции затухания спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов имеют существенные различия, которые достаточно сложным образом зависят от магнитуды землетрясения, расстояния до очага и частоты спектральных составляющих (рисунок 5).

В структуре показанных на рисунке 5 зависимостей, выделяются три участка, связанных с ближними, переходными и дальними зонами землетрясений. На первом участке (в ближних зонах) низкочастотные области спектров «мягких» и «твердых» грунтов различаются незначительно. По мере возрастания частоты колебаний уровень спектров ускорений «твердых» грунтов начинает все больше превышать уровень спектров ускорений «мягких» грунтов. При этом скорость нарастания

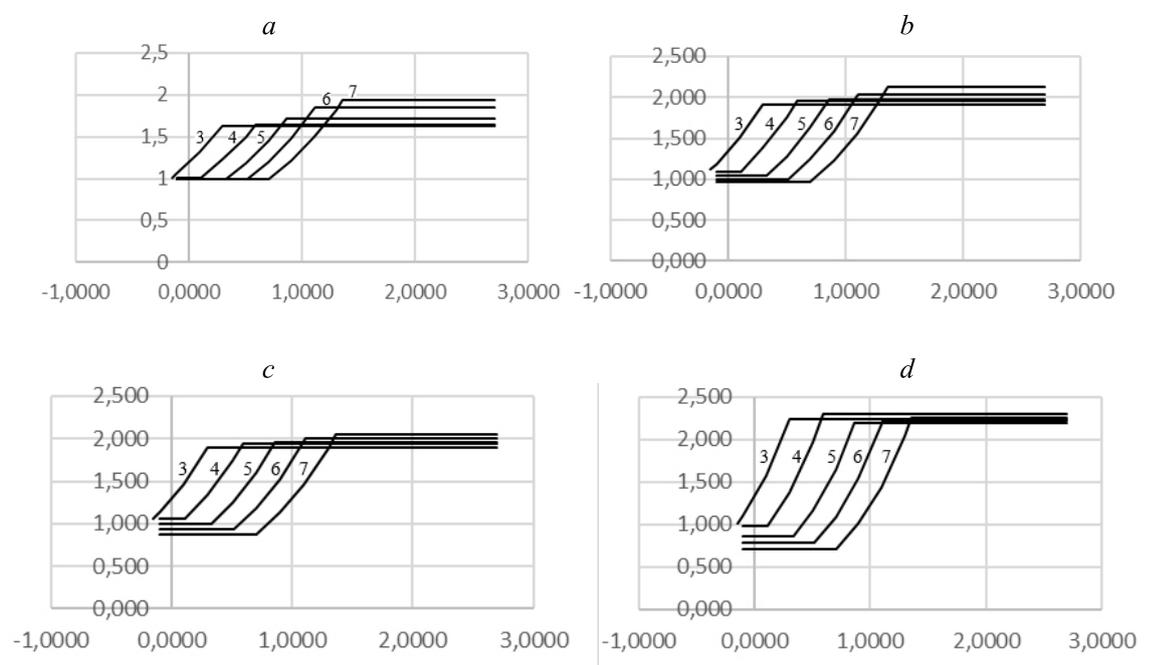


Рис. 5. Примеры отношений наиболее вероятных уровней спектров Фурье ускорений колебаний «мягких» грунтов к уровням спектров Фурье ускорений колебаний «твердых» грунтов (ось ординат) для $f = 0,36; 1,67; 7,8; 17$ Гц (индексы a, b, c, d, соответственно) при землетрясениях с разными M (цифры около кривых) и D (ось абсцисс – lgD , D в км /

Fig. 5. Examples of ratios of the most probable levels of the Fourier spectra of vibration accelerations of “soft” soils to the levels of the Fourier spectra of vibration accelerations of “hard” soils (the ordinate axis) for $f = 0.36; 1.67; 7.8; 17$ Hz (indices a, b, c, d, respectively) during earthquakes with different M (numbers near the curves) and D (the abscissa axis – lgD , D in km)

этого эффекта тем больше, чем больше магнитуда землетрясения. Так, например, спектры колебаний «твердых» грунтов на частотах 17-22 Гц при землетрясениях с $M=7$ превышают спектры колебаний «мягких» грунтов на $\sim 40\%$.

На втором участке (в переходных зонах) наблюдаются наибольшие изменения в поведении рассматриваемых зависимостей. В этих зонах происходит основная перестройка (инверсия) соотношений между спектрами двух сравниваемых типов грунтов. Именно в этих зонах уровни спектров колебаний «мягких» грунтов по отношению к спектрам «твердых» грунтов повышаются и достигают максимума. Наиболее интенсивно этот процесс происходит для высоких значений f и M . Так, при землетрясениях с $M=7$ разница в уровнях спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов для частот $f=17-22$ Гц на участке от r_0' до r_0 изменяется от -40% до $+230\%$. Сходным образом изменяются вышеописанные соотношения и для землетрясений других магнитуд и для спектральных составляющих на других частотах.

На третьем участке, включающем собственно дальние зоны и подзоны дальней зоны наблюдается стабилизация достигнутых в переходных зонах соотношений между спектрами «мягких» и «твердых» грунтов, которые здесь составляют $\sim 200\%$ (170-230%).

Полученным результатам могут быть даны разные интерпретации. Так можно предположить, что исходные спектры «мягких» грунтов отражают некоторую «среднестатистическую» реакцию верхнего «мягкого» слоя, лежащего на подстилающем его жестком «скальном» полупространстве. Реакцию же (тоже «среднестатистическую») самого «скального» полупространства, без верхнего «мягкого» слоя, в наших опытах представляют спектры «твердых» грунтов. Верхний более рыхлый слой может усиливать сейсмические колебания, подходящие к нему снизу из более твердого полупространства. В формировании общего эффекта такого усиления важную роль обычно играют два фактора. Первый – разница в сейсмических жесткостях верхнего «мягкого» слоя и подстилающего его более «твердого» полупространства. Второй фактор связан с конструктивной интерференцией сейсмических волн в верхнем более «мягком» слое. В то же время верхний более «мягкий» слой может и ослаблять подходящие снизу сейсмические сигналы за счет нелинейного поведения во время интенсивных сейсмических воздействий (см., например, [Залишвили и др., 2021]). Влияние этих двух факторов может происходить по-разному при различных сочетаниях величин M , D и f . Так, например, в ближней зоне, где из-за протяженности очага землетрясения и хаотичности распределения в нем отдельных «субисточников», с работой которых обычно связано короткопериодное излучение, первичные очаговые сейсмические сигналы становятся некогерентными (см. [Костров, 1975]), вследствие чего, ухудшаются условия для конструктивной интерференции. Кроме того, из-за высокой интенсивности подходящих из более жесткой среды сейсмических сигналов в «мягких» грунтах возрастают нелинейные эффекты, ограничивающие по амплитуде колебательную составляющую сейсмических движений. Данный эффект тем больше, чем интенсивнее сейсмические колебания в «твердом» слое т.е. чем больше M . Учитывая также, что «мягкие» грунты в верхней части разреза как правило имеют ограниченную мощность можно ожидать, что влияние вышеуказанных факторов наиболее отчетливо может проявляться в высокочастотных областях спектров. Именно такое поведение колебаний «мягких» и «твердых» грунтов наблюдается в наших опытах.

По мере удаления от очагов землетрясений (в переходных зонах) постепенно начинают преобладать факторы, повышающие наблюдаемые ускорения «мягких» грунтов по отношению к «твердым». Так, с одной стороны, на более далеких расстояниях первичные очаговые сейсмические сигналы становятся более когерентными и улучшаются условия для возникновения конструктивной интерференции сейсмических волн, а с другой, при уменьшении с расстоянием интенсивности колебаний снижаются и нелинейные эффекты в «мягких» грунтах. Совместное влияние этих факторов приводит к тому, что в переходных зонах в условиях «мягких» грунтов наблюдается затухание сейсмических сигналов более медленное, чем в условиях «твердых» грунтов, где влияние этих двух факторов изначально имеет меньшее значение. Здесь также, как и в ближних зонах в наиболее явном виде указанные эффекты проявляются на высоких частотах

Не противоречит данной версии и наблюдаемое в наших опытах поведение «мягких» и «твердых» грунтов в дальней зоне и в последующих подзонах, где влияние некогерентности очагового излучения и нелинейности «мягких» грунтов практически прекращается и остаются только факторы (различия в сейсмических жесткостях и меньше, конструктивная интерференция), стабильно повышающие интенсивность колебаний на «мягких» грунтах по отношению к «твердым» в среднем в 2 раза. Этот результат полностью согласуется с многочисленными натурными данными полученными многими исследователями при изучении удаленных и слабых землетрясений, в различных сейсмоактивных районах мира.

Заключение

Результаты настоящих исследований показывают, что различия между сейсмическими воздействиями, наблюдаемые в условиях более «мягких» и более «твердых» грунтов, могут иметь иной, более сложный характер, чем это принимается сейчас во многих практиках по оценке сейсмической опасности и сейсмического риска (см. выше). Эти различия могут быть количественно описаны в удобных для дальнейших прогнозных оценок терминах магнитуд, удаленностей и частот. Очевидно, что практическое использование этих новых данных будет корректировать оценки, выполняемые с обычно используемыми соотношениями. Вопрос о том, в каких случаях и насколько велики могут быть такие коррекции планируется рассмотреть на следующем этапе исследований по данной тематике. Следует подчеркнуть, что полученные результаты в определенной мере имеют предварительный характер и могут в дальнейшем корректироваться и уточняться, особенно в части определения отдельных параметров аппроксимирующих выражений и других деталей. В то же время по ряду более общих позиций, как представляется, уже сейчас могут быть сделаны следующие основные **выводы**:

1. Проведенные исследования показали, что количественные соотношения между характеристиками ускорений колебаний грунтов с существенно различными сейсмическими свойствами («мягких» и «твердых» грунтов) имеют сложный характер и зависят от различных сочетаний таких факторов, как магнитуда землетрясения, удаленность от очага и частота сейсмического колебания.

2. Полученные в результате исследований соотношения существенно отличаются от большинства используемых в отечественных и ряда других инженерно-сейсмологических практиках.

3. Вопрос о том, как именно и в какой мере применение этих новых данных может повлиять на современные вероятностные оценки сейсмической опасности и

сейсмического риска в различных сейсмогеологических условиях Российской Федерации представляется основным в продолжении исследований по данной тематике.

Литература

1. Адылов С. К., Соколов В. Ю., Фремд В. М., Чернов Ю. К. Сильные землетрясения Узбекистана в 1984-1985 гг. – М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1988. – 121 с.
2. Брун Дж. Н. Физика сильных движений, вызванных землетрясениями. // Сейсмический риск и инженерные решения. – М.: Недра, 1981. – С. 129-161.
3. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: Изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1986. – 368 с.
4. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. – Южно-Сахалинск, 1997. – 340 с.
4. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. (Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства.). – М.: Наука, 1981. – 265с.
5. Джурик В. И., Серебренников С. П., Дреннов А. Ф., Брыжак Е. В., Усынин Л. А., Шагун А. Н., Еськин А. Ю. К районированию сейсмической опасности территории г. Иркутска. // Серия «Наук о Земле». – 2011. – Т. 4. №2. – С. 61-81.
6. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Макиев В. Д. Макросейсмическое проявление сейсмических событий, обусловленное влиянием грунтовых условий и формирование карт сейсмического микрорайонирования. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – Т. 8. № 1. – С. 48-55.
7. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Габараев А. Ф., Мерзликин Т. И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 70-82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006
8. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Никонова Н. В., Смирнова Л. Н., Уздин А. М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 75-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
9. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 174 с.
10. Рустанович Д. Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. – М.: Наука, 1974. – 97 с.
11. Чернов Ю. К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: Изд-во «ФАН», 1989. – 295 с.
12. Чернов Ю. К., Чернов А. Ю., Читишвили М. И. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть 2. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. №3. – С. 161-178. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36753
13. Штейнберг В. В., Сакс М. В., Аптикаев Ф. Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М.: Наука, 1993. – С. 5-94.
14. Analysis of strong-motion accelerograms. Vol. I, part A-V, Vol. II, part A-V, Vol. III, part A-V, Vol. IV, part A-V, Index (EERS' Rep 76-P2), Earthquake Engineering Research Labor., California Inst. Technol. Pasadena, California, USA, 1969-1976.
15. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978. – Vol. 13. No. 5, No. 6, No. 7, No. 8, No. 9.
16. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms University “Kirill and Mefodij”. Skopje, Yugoslavia. – 1984. No. 1-3.

17. Porcella R. L., Matthiesen R. B., Maley R. P. Strong motion data records in the United States. Imperial Valley, California Earthquake of October 15, 1979. // Geological Survey Professional Paper 1254. – Washington, 1982. – pp. 289-318.
18. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake, Skopje. – 1979. No. 64. – 78 p.; No. 67. – 184 p.
19. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U. S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. – Washington, D. C., 1973. – 482 p.
20. Strong-motion earthquake accelerograms, digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. – Vol. 1, Part 1-5, Commissions CHEM-ENEI, Itaiy, 1975-1979.
21. The Northridge, California Earthquake of January 17. Central Reconnaissance Report. National Center for Earthquake Engineering Research. Edited by J.D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994.

References

1. Adylov S.K., Sokolov V.Yu., Fremd V.M., Chernov Yu.K. Strong earthquakes in Uzbekistan in 1984-1985. Moscow. Publishing House of the Institute of Physics of the Earth AS USSR. 1988. 121 p. (In Russ.)
2. Brun Dzh. N. Physics of strong motions caused by earthquakes. Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra. 1981. pp. 129-161. (In Russ.)
3. Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Publishing house “FAN” of the Uzbek SSR. 1986. 368 p. (In Russ.)
4. Geodynamics of the tectonosphere of the conjunction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Vol. 6. Problems of seismic hazard in the Far East region. Yuzhno-Sakhalinsk. 1997. 340 p. (In Russ.)
4. Dagestan earthquake on May 14, 1970 (Destructive consequences. Engineering seismology. Issues of earthquake-resistant construction). Moscow. Nauka. 1981. 265 p. (In Russ.)
5. Dzhurik V.I., Serebrennikov S. P., Drennov A. F., Bryzhak E. V., Usynin L. A., Shagun A. N., Eskin A. Yu. Zoning of seismic hazard of the territory of Irkutsk. Earth Sciences. 2011. Vol. 4. No. 2. pp. 61-81. (In Russ.)
6. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Makiev V.D. Macroseismic evidence of seismic events caused by influence of ground conditions and formation of maps of seismic Microzonation. Geology and Geophysics of Russian South. 2018. Vol. 8 (1). pp. 48-55. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A. F., Merzlikin T. I. Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11 (4). pp. 70-82. DOI: 10.46698/VNC. 2021.77.59.006 (In Russ.)
8. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Nikonova N. V., Smirnova L. N., Uzdin A. M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12 (1): pp. 75-88. DOI: 10.46698/VNC. 2022.74.27.006. (In Russ.)
9. Kostrov B. V. Focal mechanics of a tectonic earthquake. Moscow. Nauka. 1975. 174 p. (In Russ.)
10. Rustanovich D.N. Vibrations of the ground surface in the epicentral zones of strong earthquakes. Moscow. Nauka. 1974. 97 p. (In Russ.)
11. Chernov Yu. K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic hazard of territories. Tashkent. Publishing House “FAN”. 1989. 295 p. (In Russ.)
12. Chernov Yu. K., Chernov A. Yu., Chitishvili M. I. Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. Part II. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9 (3). pp. 161-178. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36753. (In Russ.)

13. Shteinberg V. V., Saks M. V., Aptikaev F. F. etc. Methods for seismic effects assessment (textbook). Issues of engineering seismology. Issue 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5-94. (In Russ.)
14. Analysis of strong-motion accelerograms. Vol. I, part A-V, Vol. II, part A-V, Vol. III, part A-V, Vol. IV, part A-V, Index (EERS' Rep 76-P2), Earthquake Engineering Research Labor., California Inst. Technol. Pasadena, California, USA, 1969-1976.
15. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978. Vol. 13. No. 5, No. 6, No. 7, No. 8, No. 9.
16. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms University “Kirill and Mefodij”. Skopje, Yugoslavia. 1984. No. 1-3.
17. Porcella R. L., Matthiesen R. B., Maley R. P. Strong motion data records in the United States. Imperial Valley, California Earthquake of October 15, 1979. Geological Survey Professional Paper 1254. Washington, 1982. pp. 289-318.
18. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake, Skopje. 1979. No. 64. 78 p.; No. 67. 184 p.
19. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U. S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D. C., 1973. – 482 p.
20. Strong-motion earthquake accelerograms, digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. – Vol. 1, Part 1-5, Commissions CHEM-ENEI, Italy, 1975-1979.
21. The Northridge, California Earthquake of January 17. Central Reconnaissance Report. National Center for Earthquake Engineering Research. Edited by J. D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 550.34.06.013.3

DOI: [10.46698/VNC.2022.12.99.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.12.99.005)

Оригинальная статья

Применение сейсмических и сейсмоакустических методов для выявления путей миграции углеводородов и повышения нефтеотдачи пластов в зонах тектонических нарушений Восточнобортовой нефтегазоносной области Прикаспийской впадины

Е. А. Данилова ^{1, 2}, В. В. Дрягин ¹

¹Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100;

²Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского
отделения Российской академии наук, Россия, 620016, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: yevgeniya. antoninovna@bk. ru

Статья поступила: 06.06.2022, доработана: 08.07.2022, принята к публикации: 17.07.2022

Резюме: Актуальность работы. Месторождения нефти и газа Восточнобортовой нефтегазоносной области Прикаспийской впадины характеризуются сложным тектоническим строением. Анализ разработки нефтегазоконденсатного месторождения Алибекмола показывает, что по малоамплитудным разломам и зонам трещиноватости, представляющим собой фильтрующие каналы, тектонические блоки залежей сообщаются между собой, что положительно влияет на процесс их освоения. **Целью работы** являлся анализ результатов применения сейсмических и сейсмоакустических методов выявления зон трещиноватости, путей миграции углеводородов и повышения нефтеотдачи пластов в зонах тектонических нарушений изучаемой области на примере месторождения Алибекмола. **Методы работы.** Проведена обновленная интерпретация временных сейсмических профилей МОГТ-3D, пересекающих месторождение в субширотном и субмеридиональном направлениях с применением авторских методических приемов. При интерпретации учитывались сейсмогеологические признаки обнаружения геодинамических очагов генерации углеводородов в фундаменте. Для изучения текущей нефтенасыщенности и стимулирования добычи нефти из продуктивных пластов АНГКМ был применен метод каротажа вызванной сейсмоакустической эмиссии в цикле с одновременным акустическим воздействием на призабойную зону в скважине №54. **Результаты работы.** По новой интерпретации месторождение нефти и газа Алибекмола в поперечном сечении представляет собой приразломное горстовидное поднятие. В породах осадочного чехла выявлена сеть малоамплитудных нарушений, имеющих строение «цветка». Некоторые разломы трассируются из подсолевых отложений в надсолевые породы, что указывает на их неотектоническую природу. Крупные глубинные нарушения тектонически экранируют нефтяную и газонефтяную залежи. Большинство разломов трассируются из фундамента. Некоторые из них одновременно затрагивают залежь нефти и газа, прорывают соленосную толщу кунгурского возраста, «застревая» в ней или «выходя» в надсолевых отложениях. Нарушения служат путями миграции углеводородов. В продольном сечении месторождение представляет собой сочетание горстов и грабенов. Результаты исследования скважины №54 методом сейсмоакустической эмиссии подтверждают наличие трещинных коллекторов в нефтяной залежи и показывают, что после проведения исследования и акустического воздействия в работающих интервалах увеличилась акустическая эмиссия пласта, а вместе с ней и приток флюида. Продуктивность скважины улучшилась, работающих пропластков стало больше. Во многих случаях сигнал акустической эмиссии

стал иметь более выраженный характер, что соответствует наличию трещинного коллектора. Интервал, подвергшийся акустическому воздействию, в результате которого произошла положительная динамика в работе скважины, совпадает с выявленным разломом, подтверждая его существование. Сделаны выводы о том, что месторождение Алибекмола представляет собой результат вертикальной миграции углеводородов, с помощью метода КВК-САЭ можно непосредственно влиять на фильтрационную способность ее путей.

Ключевые слова: Восточнобортная нефтегазоносная область, Прикаспийская впадина, нефтегазо-конденсатное месторождение Алибекмола, сейсмические методы, сейсмоакустические методы, нефтеотдача пластов, тектонические нарушения, пути миграции углеводородов, структура «цветка», трещинный коллектор.

Благодарности: Исследования выполнены в рамках тем №1021052504590-8-1.5.4 государственного задания ИГ УрО РАН и №АААА-А19-119072990020-6 государственного задания ИГГ УрО РАН.

Для цитирования: Данилова Е. А., Дрягин В. В. Применение сейсмических и сейсмоакустических методов для выявления путей миграции углеводородов и повышения нефтеотдачи пластов в зонах тектонических нарушений Восточнобортной нефтегазоносной области Прикаспийской впадины. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 79-93. DOI: 10.46698/VNC. 2022.12.99.005.

GEOPHYSICAL METHODS

[DOI: 10.46698/VNC. 2022.12.99.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.12.99.005)

Original paper

Application of seismic and seismoacoustic methods to identify migration routes of hydrocarbon and enhanced oil recovery in zones of tectonic faults in the Vostochnobortovaya oil and gas region of the Peri-Caspian Depression

E. A. Danilova ^{1, 2}, V. V. Dryagin ¹

¹Institute of Geophysics named after Y. P. Bulashevich, Ural branch, Russian Academy of Sciences, 100 Amundsen str., Ekaterinburg 620016, Russian Federation;

²Institute of Geology and Geochemistry named after Academician A. N. Zavaritsky, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 15 Akademika Vonsovsky str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation, e-mail: yevgeniya. antoninovna@bk. ru

Received: 06.06.2022, revised: 08.07.2022, accepted: 17.07.2022

Abstract: Relevance. The oil and gas fields of the Vostochnobortovaya oil and gas bearing region of the Peri-Caspian Depression are characterized by a complex tectonic structure. The analysis of the Alibekmola oil and gas condensate field development shows that tectonic blocks of deposits intercommunicate along low-amplitude faults and fracture zones, which have the form of filter channels, and which positively affects the process of their development. **The aim** of the work was to analyze the results of the application of seismic and seismoacoustic methods to identify fracture zones, migration routes of hydrocarbon and enhanced oil recovery in zones of tectonic disturbances in the study area using the Alibekmola field as an example. **Methods.** An

updated interpretation of the temporary seismic profiles of CDPМ -3D, crossing the field in the sublatitudinal and submeridional directions, was carried out using the author's methodological techniques. The interpretation took into account the seismogeological signs of the discovery of geodynamic centers of hydrocarbon generation in the basement. To study the current oil saturation and stimulate oil production from the productive strata of the AOGCF, the well log of the induced seismoacoustic emission in a cycle with simultaneous acoustic impact on the near a heading zone in well No. 54, was applied. **Results.** According to the new interpretation, the Alibekmola oil and gas field in cross section is a near-fault horst-like uplift. In the rocks of the sedimentary cover, a network of low-amplitude faults with the "flower" structure was identified. Some faults are traced from subsalt deposits to post-salt rocks; this fact indicates their neotectonic nature. Large deep disturbances tectonically shield oil and gas-oil deposits. Most faults are traced from the basement. Some of them simultaneously affect the oil and gas deposit, break through the salt-bearing strata of the Kungurian age, "getting stuck" in it or "coming out" in the post-salt deposits. Disturbances serve as routes for the migration of hydrocarbons. In longitudinal section, the deposit is a combination of horsts and grabens. The results of the study of well No. 54 using the method of seismoacoustic emission confirm the presence of fractured reservoirs in the oil deposit and show that after the study and acoustic impact in the working intervals the acoustic emission of the formation increased, and with it the fluid inflow. Productivity of the well has improved, the number of working interlayers increased. In many cases, the acoustic emission signal became more pronounced, which corresponds to the presence of a fractured reservoir. The interval subjected to acoustic impact, as a result of which there was a positive dynamics in the work of the well, coincides with the identified fault, confirming its existence. It is concluded that the Alibekmola field is the result of vertical migration of hydrocarbons; using the KVK-SAE method, it is possible to influence directly the filtration capacity of its routes.

Keywords: Vostochnobortovaya oil and gas bearing area, Peri-Caspian Depression, Alibekmola oil and gas condensate field, seismic methods, seismoacoustic methods, oil recovery, tectonic faults, migration routes of hydrocarbon, "flower" structure, fractured reservoir.

Acknowledgments: The study carried out within the state task of the Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (topic no. 1021052504590-8-1.5.4) and Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (topic no. AAAAA 19-119072990020-6).

For citation: Danilova E. A., Dryagin V. V. Application of seismic and seismoacoustic methods to identify migration routes of hydrocarbon and enhanced oil recovery in zones of tectonic faults in the Vostochnobortovaya oil and gas region of the Peri-Caspian Depression. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2022. 12 (3): 79-93. DOI: 10.46698/VNC. 2022.12.99.005.

Введение

Восточнобортювая нефтегазоносная область расположена на юго-западе Актюбинской области Казахстана, в среднем и нижнем течении реки Эмба (рис. 1). В литературе встречаются другие ее названия – Восточно-Эмбинская, Кенкияк-Жаназольская, Жаркамыс-Темирская [Ахияров, Семенова, 2013; Месторождения нефти и газа Казахстана, 1999]. В геотектоническом плане относится к южной части древней Восточно-Европейской платформы, восточному борту Прикаспийской впадины. Находится в зоне сочленения платформы с Уральской складчатой системой, имеет ступенчатое строение фундамента [Дальян и др., 1972]. По структурной ситуации и геологическому районированию территории Российской Федерации данную область можно отнести к продолжению Предуральского краевого прогиба и зоны передовых складок Урала на территории Казахстана (см. рис. 1). В пределах области открыто несколько нефтяных, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений, таких как Жагабулак, Жаназол, Каратюбе, Кенкияк, Урихтау, Алибекмола, Кожасай и др. Глубина залегания продуктивных комплексов области 200-6500 м, ресурсы составляют 2 млрд т нефти и 1,5 трлн м³ газа [Месторождения нефти и газа Казахстана, 1999].

Залежи углеводородов (УВ) в подсолевой части разреза (O₁-P_{1k}) преимущественно пластовые тектонически экранированные, приурочены к карбонатным и

терригенным коллекторам карбона и нижней перми. При подсчете запасов рассматриваются как поровые [Месторождения нефти и газа Казахстана, 1999], хотя существование в них разломов и трещинных коллекторов широко описывается в литературе [Ахияров, Семенова, 2013]. Например, сейсморазведка МОГТ-3Д на нефтегазоконденсатном месторождении Алибекмола (АНГКМ) выявила одиннадцать тектонических блоков в его составе (Мусина и др., 2012). Анализ разработки месторождения показывает, что по малоамплитудным разломам и зонам трещиноватости, представляющим собой фильтрующие каналы, блоки сообщаются между собой, что положительно влияет на процесс освоения (Мусина и др., 2012ф).

С трещинообразованием и процессами вторичной миграции УВ связаны и месторождения УВ в надсолевой части (P₂-Q) разреза Восточнортовой нефтегазоносной области. Залежи приурочены к терригенным коллекторам мезозоя и солянокупольным структурам кунгурского яруса нижней перми [Бакиров, 1992; Дальян и др., 1972; Исканиев, 2018; Месторождения нефти и газа Казахстана, 1999].

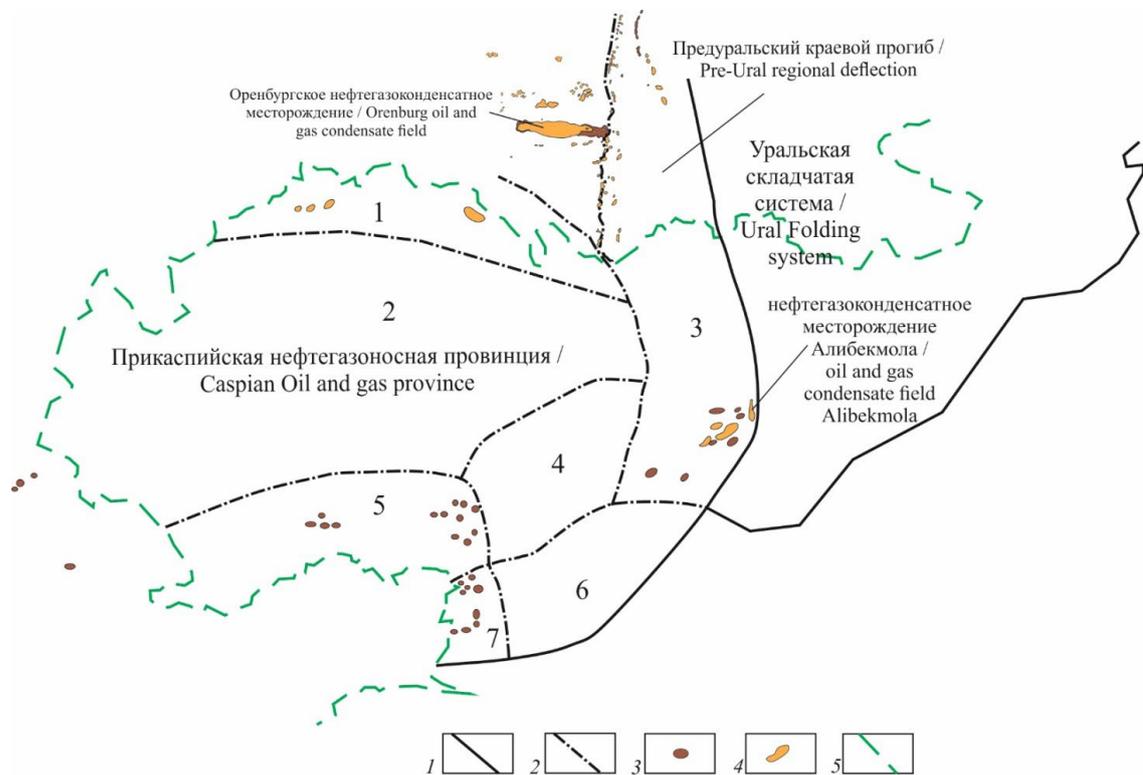


Рис. 1. Схема размещения нефтегазоносных областей Прикаспийской нефтегазоносной провинции (по данным [Дальян и др., 1972; Данилова, 2020; Месторождения нефти и газа Казахстана, 1999]). Нефтегазоносные области 1 – Северобортовая, 2 – Центрально-Каспийская, 3 – Восточно-Эмбинская, 4 – Северо-Эмбинская, 5 – Астрахань-Макацкая, 6 – Южно-Эмбинская, 7 – Приморско-Эмбинская. Условные обозначения: 1 – границы нефтегазоносной провинции; 2 – границы нефтегазоносных областей; 3 – нефтяные месторождения; 4 – газо- и нефтегазоконденсатные месторождения; 5 – граница Казахстана /

Fig. 1. The layout of the oil and gas regions of the Caspian oil and gas province (according to [Dalyan et al., 1972; Danilova, 2020; Oil and gas fields of Kazakhstan, 1999]). Oil and gas bearing areas 1 – Severobortovaya, 2 – Central Caspian, 3 – East Embinskaya, 4 – North Embinskaya, 5 – Astrakhan-Makatskaya, 6 – South Embinskaya, 7 – Primorsko-Embinskaya. Symbols: 1 – the boundaries of the oil and gas province; 2 – the boundaries of oil and gas; 3 – oil fields; 4 – gas and oil and gas condensate fields; 5 – the border of Kazakhstan

Целью представленной работы являлся анализ результатов применения сейсмических и сейсмоакустических методов выявления зон трещиноватости, путей миграции УВ и повышения нефтеотдачи пластов в зонах тектонических нарушений Восточнобортовой нефтегазоносной области Прикаспийской впадины на примере АНГКМ.

Геологический очерк

АНГКМ открыто в 1986 году при бурении скважины №5 на структуре, выявленной по данным сейсморазведочных работ ОГТ 1980 года в пределах Жанажолской тектонической ступени. Согласно сейсмическим данным углеводородная залежь состоит из двух крупных поднятий (северного и южного) и приурочена к брахиантиклинальной складке вдоль разлома субмеридианальной ориентировки [Месторождения нефти и газа Казахстана, 1999].

Породы кристаллического фундамента (Ar-Pr₁), рифейские, вендские, ордовикские, силурийские и девонские отложения на территории АНГКМ бурением не изучены. Отложения каменноугольной и пермской систем, с которыми связана продуктивность месторождения, представлены терригенными и карбонатными породами. К ним приурочены две продуктивные толщи КТ-I и КТ-II, разделенные межкарбонатной толщей пород (МКТ) [Месторождения нефти и газа Казахстана, 1999].

Нижняя карбонатная толща КТ-II ниже-среднекарбонového возраста нефтеносная, двухкупольная. Северный купол имеет размеры 4,7 x 2 км и амплитуду 70 м. Южный купол – 7,8 км и амплитуду до 300 м. Продуктивность связана с отложениями башкирского и московского ярусов среднего карбона, представленными известняками темно-серыми, органогенно-детритовыми, трещиноватыми, с прослоями доломитизированных известняков и доломитов, с редкими прослоями терригенных пород. Средняя общая толщина коллекторов – 31,5 м. Средняя пористость составляет 8%, проницаемость – $6,3 \times 10^{-3}$ мкм². В продуктивных отложениях присутствуют не только поровые коллекторы, но и каверново-поровые, порово-трещинные и каверново-трещинные. Средняя глубина залегания толщи – 3050 м (Мусина и др., 2012).

МКТ представлена терригенно-карбонатными породами нижней части московского яруса (подольский горизонт), на 50-90% сложена аргиллитами и песчаниками. В отдельных частях разреза среди аргиллитов залегают карбонатные породы. В породах МКТ отмечается наличие мелких линзообразных нефтяных залежей, общей средней толщиной коллекторов 9,2 м, пористостью 7%. Средняя глубина залегания толщи 2600 м (Мусина и др., 2012).

Верхняя залежь КТ-I нефтегазоконденсатная, ее кровля стратиграфически относится к отложениям гжельского яруса верхнего карбона, представленным в основном органогенными трещиноватыми известнякам. Структура однокупольная, имеет размеры 16 x 5 км и амплитуду около 600 м. Средняя общая толщина коллектора 67,7 м, пористость 1%, проницаемость $6,08 \times 10^{-3}$ мкм². Средняя глубина залегания толщи – 1722 м. Покрышкой служат глинистые отложения ассельского яруса и кунгурской соленосной толщи нижней перми общей толщиной от 800 до 1500 м (Мусина и др., 2012).

По результатам исследования подсолевых отложений в скважинах пластовым микроимиджером FMI на месторождении выявлены открытые, частично открытые и залеченные трещины, большая часть которых зафиксирована в приразломных зо-

нах. Трещины разнонаправленные, большинство из них имеют северо-западное направление. Углы падения трещин меняются от 10 до 90°, максимальная плотность достигает до 44 трещин на метр, средняя раскрытость – 0,001-0,1 мм (Мусина и др., 2012ф).

Надсолевые, в основном терригенные, отложения представлены породами верхней перми и мезо-кайнозоя. Залежей УВ в них выявлено не было.

Методы исследований

Для изучения зон тектонических нарушений и путей миграции УВ АНГКМ была проведена обновленная интерпретация временных разрезов МОГТ-3D, пересекающих месторождение в субширотном и в субмеридиональном направлениях, с применением авторских методических приемов выделения тектонических нарушений [Данилова, 2020, 2021]. В процессе визуального анализа сейсмических волновых полей в мелком масштабе на временном сейсмическом разрезе вручную наносились наиболее явно выделяющиеся разломы. По мере увеличения масштаба возрастала детальность интерпретации, выявлялись более мелкие тектонические нарушения. Отбраковка лишних элементов проводилась с учетом основных признаков выявления тектонических дислокаций. Такими являются: изменение гладкости границ, характера напластования пород, хаотическое поведение фаз, смещение и разрыв осей синфазности регулярных отраженных волн, потеря или ухудшение корреляции волн, появление нерегулярных, наклонных осей синфазности, локальное усиление нерегулярных волн и др. [Данилова, 2020]. При интерпретации учитывались сейсмогеологические признаки обнаружения геодинамических очагов генерации УВ в фундаменте, выявленные Даниловой в 2021 году при изучении Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения [Данилова, 2021] (см. рис. 1). Главными признаками очагов являются: наличие в строении разреза неотектонических структур «цветкового» типа, приуроченных к глубинным разломам, и их связь с солянокупольными структурами кунгурского яруса нижней перми. В породах фундамента в районах очагов генерации УВ наблюдается хаотическая субвертикально направленная сейсмическая запись, распространяющаяся ниже отражающего горизонта, отождествляемого с кровлей пород фундамента. Тектоническое строение фундамента на АНГКМ изучить не удалось. Это связано с тем, что сейсморазведочные работы МОГТ-3D ограничены глубинами залегания осадочного чехла.

Для изучения текущего состояния разрабатываемого участка залежи на основе сопоставления с данными сейсмических исследований и оценки возможностей новых технологий добычи нефти был применен метод исследования сейсмоакустической эмиссии или микросейсмических шумов в широком диапазоне частот в эксплуатационной скважине месторождения. Сейсмоакустические методы, основанные на возбуждении упругих волн звукового и ультразвукового диапазонов частот, а также на определении геоакустической эмиссии (шумов) в горном массиве, способны выявлять зоны трещиноватости [Алексеев и др., 2004; Кузнецов, 2018; Митрофанов, 1998]. Для исследования карбонатного коллектора толщи КТ-II в скважине № 54 АНГКМ был использован метод последовательного измерения вызванной сейсмоакустической эмиссии (САЭ) в цикле с акустическим воздействием (АВ) на продуктивный пласт. Метод «каротаж-воздействие-каротаж» в цикле с акустическим воздействием и измерением сейсмоакустической эмиссии (КВК-САЭ) основан на открытии научной школы профессора Кузнецова О.Л. «Законо-

мерность изменения параметров сейсмоакустической эмиссии горных пород при физическом воздействии» (диплом № 508). Закономерность изменения параметров САЭ флюидонасыщенных горных пород заключается в том, что при физическом воздействии на породы акустическая и микросейсмическая эмиссии приобретают признаки мультипликативных случайных процессов дискретного излучения сигналов упругой энергии с амплитудно-временными параметрами, соответствующими типу насыщения пород (газ, вода, нефть). Происходит активизация геологической среды [Кузнецов, 2018, 2021]. Во время АВ в насыщенных нефтью породах под действием акустического поля большой интенсивности ($5-8 \text{ Вт/см}^2$) возникают процессы излучения упругой энергии, содержащие фазы становления и релаксации. Воздействие способствует увеличению проницаемости геологической среды [Кузнецов, 2018, 2021; Митрофанов, 1998] как в призабойной, так и в удаленной зоне продуктивного пласта, которая сохраняется еще длительное время. Работы по методу КВК-САЭ в скважине № 54 проводились в интервалах глубин 3158-3378 м последовательно по всем интервалам перфорации, начиная с верхних при помощи аппаратуры ААВ – 400, разработанной Дрягиным В. В. [Дрягин, 2018]. Продолжительность АВ составляла около 2 минут на 1 метр интервала пласта. САЭ пород была замерена до и после акустического воздействия.

Результаты работы и их обсуждение

По новой интерпретации временных разрезов сейсмических профилей АНГКМ в поперечном сечении представляет собой приразломное горстовидное поднятие (рис. 2). В породах осадочного чехла месторождения выявлена сеть малоамплитудных нарушений, имеющих строение «цветка» из-за наличия основных глубинных и связанных с ними подчиненных «оперяющих» нарушений. Некоторые разломы трассируются из подсолевых отложений в надсолевые породы, что указывает на их неотектоническую природу. Крупные глубинные нарушения тектонически экранируют нефтяную и газонефтяную залежи УВ. Большинство разломов, скорее всего, трассируются из фундамента. Некоторые из них одновременно затрагивают толщи КТ-II, МКТ и КТ-II, прорывают соленосную толщу кунгурского возраста, «застревая» в ней или «выходя» в надсолевых отложениях. Такие нарушения логично назвать путями миграции УВ. Дислокации, составляющие «цветковую» структуру месторождения, влияют на конфигурацию соляного купола, моделируя все его поднятия и опускания. В вершине соляного купола развивается область «проседания» мезо-кайнозойских терригенных отложений, ограниченная новейшими разломами, в некоторых случаях прорванная ими (см. рис. 2). В продольном сечении АНГКМ представляет собой сочетание горстов и грабенов, зон растяжения и сжатия земной коры, которые являются следствием сдвиговых деформаций.

Результаты исследования скважины № 54 АНГКМ методом КВК-САЭ подтверждают наличие трещинных коллекторов в нефтяной массивно-пластовой залежи КТ-II. Вскрытая мощность продуктивной толщи составляет 863 м, средняя глубина залегания – 3200 м, проницаемость – 8,45 мД. Породы в интервале 3158-3378 м представлены преимущественно известняками с прослоями зеленовато-серых аргиллитов, относятся к продуктивному пласту КТ-II-II-4, нефтенасыщенность которого определена по ГИС. Вскрытая эффективная нефтенасыщенная толщина продуктивной толщи – 18,9 м, эффективная водонасыщенная толщина – до 33,4 м. Водонефтяной контакт принят на абсолютной отметке – 3324,8 м (см. рис. 2).

Перед началом исследования методом КВК-САЭ, согласно геофизическим данным (расходомерия, термометрия и влагометрия), основными работающими (66%) интервалами в скважине являлись глубины перфорации 3210-3216 м,

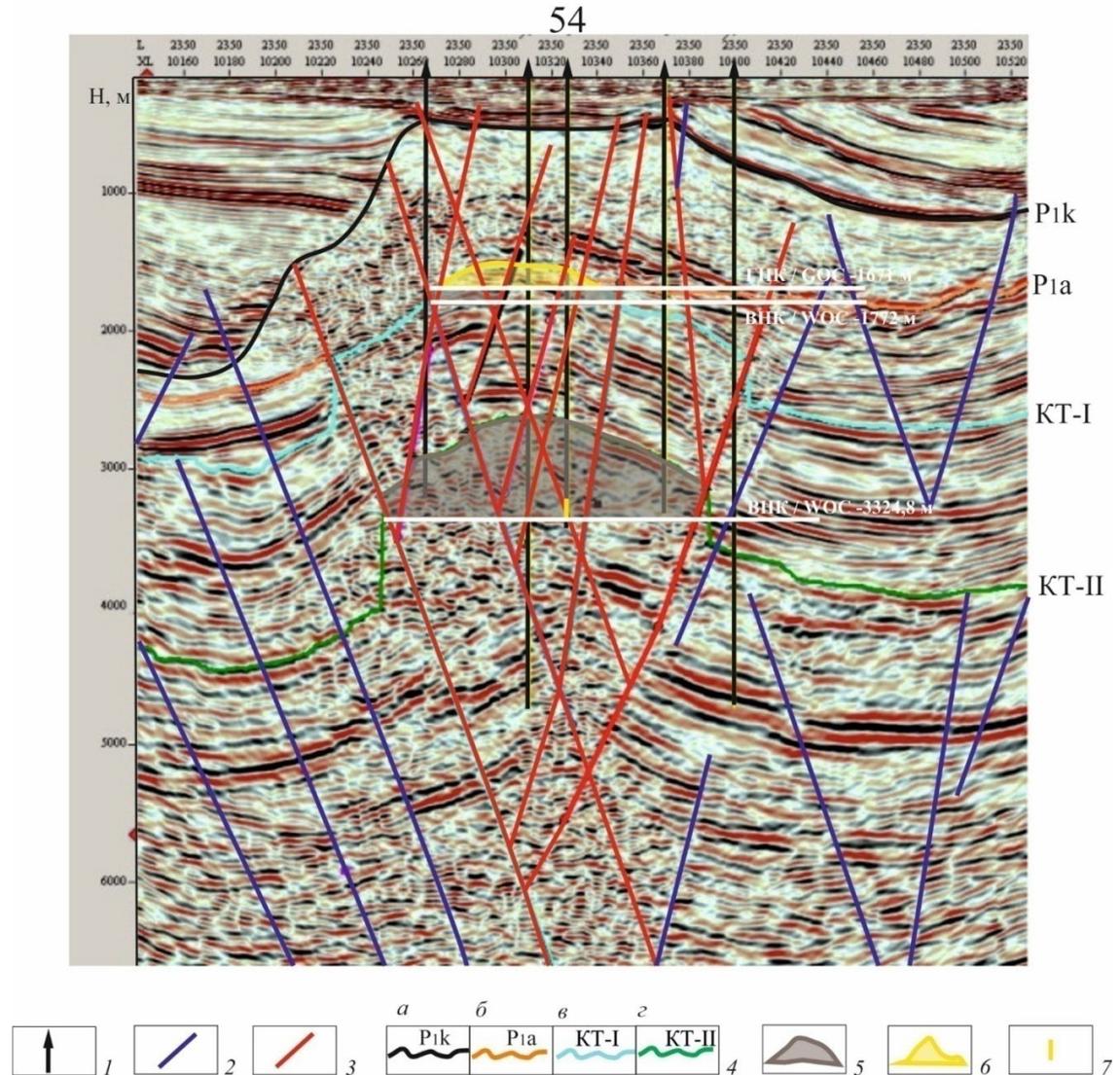


Рис. 2. Выделение тектонических нарушений. Глубинный разрез по профилю, пересекающему Южный купол АНГКМ в субширотном направлении (по материалам [Месторождения нефти и газа Казахстана, 1999]; (Мусина, 2012ф)). Условные обозначения: 1 – скважины; 2 – разломы; 3 – предполагаемые пути миграции углеводородов в зонах разломов; 4 – отражающие горизонты а) по кровле кунгурского яруса нижней перми, б) по кровле ассельского яруса нижней перми; в) по кровле пласта КТ-I; г) по кровле пласта КТ-II; 5 – нефтяная залежь; 6 – нефтегазоконденсатная залежь; 7 – интервал глубин (3158-3340 м), подвергшийся акустическому воздействию методом КВК-САЭ, в результате которого произошла положительная динамика в работе скважины № 54 /

Fig. 2. Isolation of tectonic disturbances. Deep section along the profile crossing the Southern dome of the Alibekmola deposit in the sublatitudinal direction (based on materials from [Oil and Gas Fields of Kazakhstan, 1999]; (Musina, 2012)). Symbols: 1 – wells; 2 – faults; 3 – proposed routes of hydrocarbon migration in fault zones; 4 – reflecting horizons a) along the roof of the Kungur tier of lower Perm, b) along the roof of the Assel tier of lower Perm; c) along the roof of the KT-I formation; d) along the roof of the KT-II formation; 5 – oil deposit; 6 – oil and gas condensate; 7 – depth interval (3158-3340 m), subjected to acoustic exposure by the KVK-SAE method, as a result of which there was a positive dynamics in the operation of well No. 54

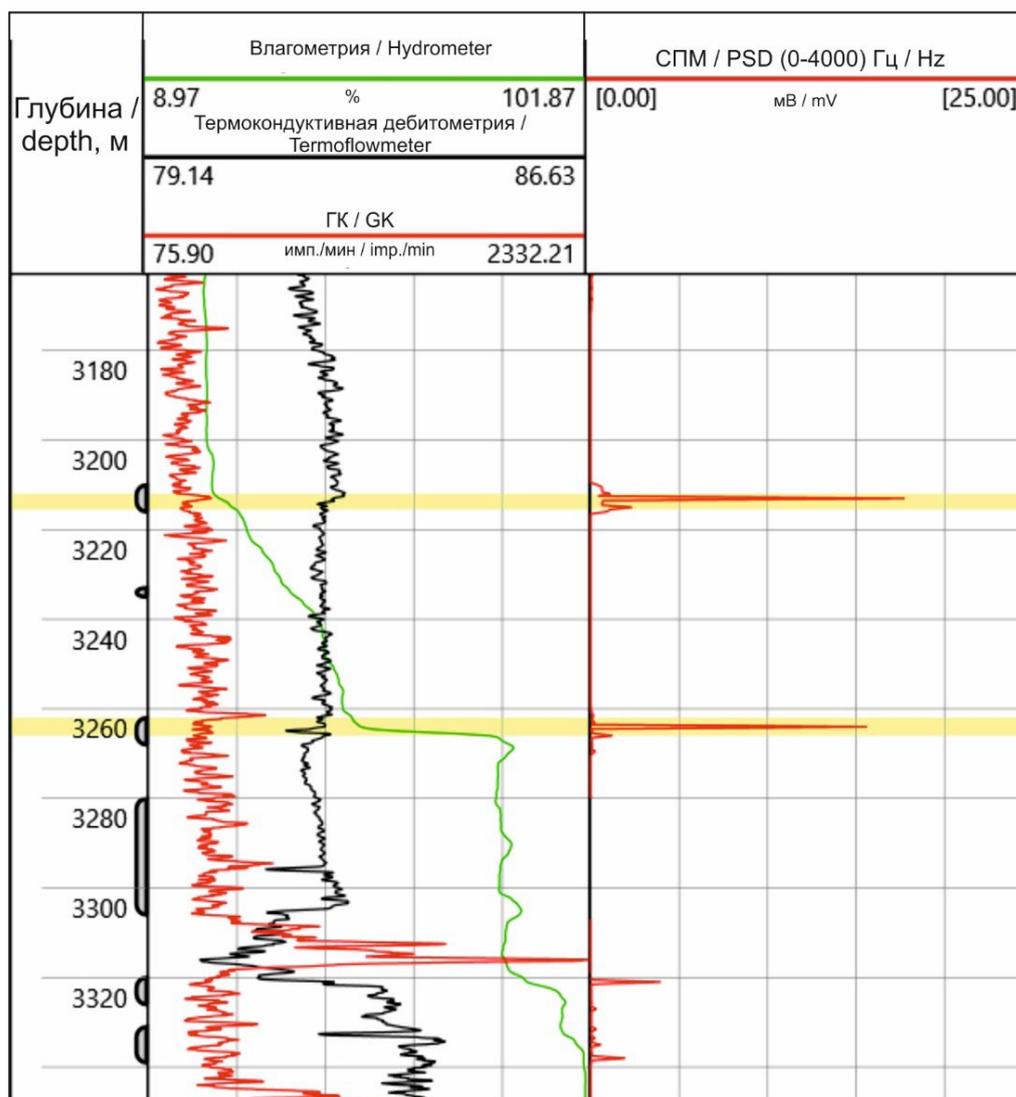


Рис. 3. Каротажная диаграмма определения профиля притока нефти в скважину № 54 и спектральной плотности мощности (СПМ) вызванной сейсмоакустической эмиссией пластов после акустического воздействия (АВ) /

Fig. 3. Logging diagram for determining the profile of oil inflow into well No. 54 and the power spectral density (PSD) caused by seismic acoustic emission of formations after acoustic impact (AI)

3262-3268 м, 3280-3306 м и 3320-3326 м (рис. 3). После кислотной обработки скважина заработала нефтью с большим содержанием газа (44%), проницаемость околоскважинной зоны увеличилась до 12,9 мД, произошел газлифт с захватом воды и подтягиванием ее вверх, отмечен рост плотности нефти над уровнем нефть+вода при переходе от штуцера 7 мм к штуцеру 11 мм.

В результате АВ на продуктивные пласты производительность работы скважины увеличилась еще значительно. В процессе воздействия, которое проводили последовательно по всем интервалам перфорации, начиная с верхних, давление на устье к моменту завершения работ в нижних интервалах перфорации возросло с 4 до 9 МПа. Также, как и после кислотной обработки, при увеличении размера штуцера произошел захват воды из пластов, о чем свидетельствовал интенсивный выброс воды, который привел к гашению факела попутного газа.

Таблица 1 / Table 1

**Увеличение нефтедобычи по методу КВК-САЭ /
Increasing oil production using the KVK-SAE method**

Интервал исследования, м / Study interval, m	Дебит, т/сут. / Production rate, tonnes per day	Прирост энергии САЭ / Energy growth of SAE	Работающий интервал, м / Working interval, m
3210-3216	139,6	180%	3212-3214
3260-3270	29,8	22%	3262-3264
3280-3306	82,2	11,6%	3292-3294
3320-3326	25,3	59%	3320-3322

Метод позволил выявить новые продуктивные пропластки пород. В таблице 1 показаны интервалы исследования и участки рабочих интервалов с дебитом нефти и суммарным приростом в них энергии вызванной САЭ. Так как АВ проводилось равномерно по всем интервалам исследования на минимальной скорости каротажа (~ 50 м/час), все точки пласта получили одинаковую дозу воздействия силовым акустическим полем. Однако, отклик геологической среды в виде акустической эмиссии от разных точек пласта не был одинаковым и зависел от характера насыщенности и фильтрационных свойств пород. Во многих случаях сигнал акустической эмиссии стал иметь более выраженный дискретный характер, что соответствует наличию трещинного коллектора. Это явление, вероятно, связано с раскрытием трещин и, соответственно, путей миграции УВ. Интервал, подвергшийся акустическому воздействию методом КВК-САЭ, в результате которого произошла положительная динамика в работе скважины № 54, совпадает с выявленным нами разломом, подтверждая его существование (см. рис. 2).

Характерный пример каротажа в зоне трещиноватости и, соответственно, притока из пласта на интервале 3260-3270 метров приведен на рисунке 4, где представлены каротажные диаграммы энергии САЭ до (синяя линия) и после (красная линия) АВ, а также спектрограмма сигнала САЭ. Отсутствие вызванной САЭ в некоторых интервалах АВ демонстрирует отсутствие нефтенасыщенных трещин. Характерным для карбонатных трещинных коллекторов является дискретный спектр сигнала САЭ, который в частотном диапазоне не превышает значений 2 кГц. Тогда как для пористых терригенных коллекторов характерен непрерывный спектр, содержащий частоты до 20 кГц. Спектры САЭ в перфорированных точках продуктивного пласта показаны на рис 4б и 4 в. Они имеют дискретный характер, но разный состав по амплитуде и частоте. Это связано с различной структурой трещинного пространства, в котором происходит фильтрация и миграция УВ. На рис 4г показан спектр сигнала САЭ в точке 3269,5 м, которая находится за пределами интервала перфорации. Аналогичные с предыдущими интервалами спектры САЭ свидетельствуют о схожих фильтрационных свойствах пород и, следовательно, о возможности вовлечения данного интервала в разработку месторождения.

Результаты работы и их обсуждение

Обновленная интерпретация временных разрезов сейсмических профилей, пересекающих АНГКМ, показала, что месторождение представляет собой результат

вертикальной миграции УВ. Об этом свидетельствует его многопластовость, наличие в строении системы неотектонических разломов «цветкового» типа, мелких залежей нефти в толще МКТ.

К месторождениям, связанным с вторичной вертикальной миграцией УВ в Прикаспии, обычно относят залежи в надсолевых мезозойских пластах, добыча нефти из которых в Восточнобортной нефтегазоносной области успешно ведется на месторождениях Жаксымай, Каратюбе и Кенкияк [Бакиров и др., 1992; Исказиев, 2018]. Аналогичная связь выявляется и для подсолевых отложений АНГКМ. Наличие в его строении проводящих разломов и трещинных коллекторов подтверждается выполненными сейсмическими и сейсмоакустическими исследованиями.

Считается, что одной из самых важных задач при поисках скоплений УВ в регионе является выявление органогенных построек, так как восточный борт Прикаспийской впадины – это глубокозалегающий шельф Уральского палеобассейна, на котором формировались карбонатные платформы [Ахияров, Семенова, 2013]. К их числу относят и структуру АНГКМ. «Биогермные» тела на временных разрезах характеризуются как хаотическое поведение фаз и отсутствие отражений. Хотя эти же признаки могут свидетельствовать и о зонах трещиноватости. На наш взгляд, поиски новых месторождений УВ в Восточнобортной нефтегазоносной области Прикаспийской впадины следует вести с применением геодинамических подходов, а сейсморазведочные работы нельзя ограничивать глубинами осадочного чехла, так как информация о строении фундамента может способствовать изучению путей миграции УВ в зонах тектонических нарушений.

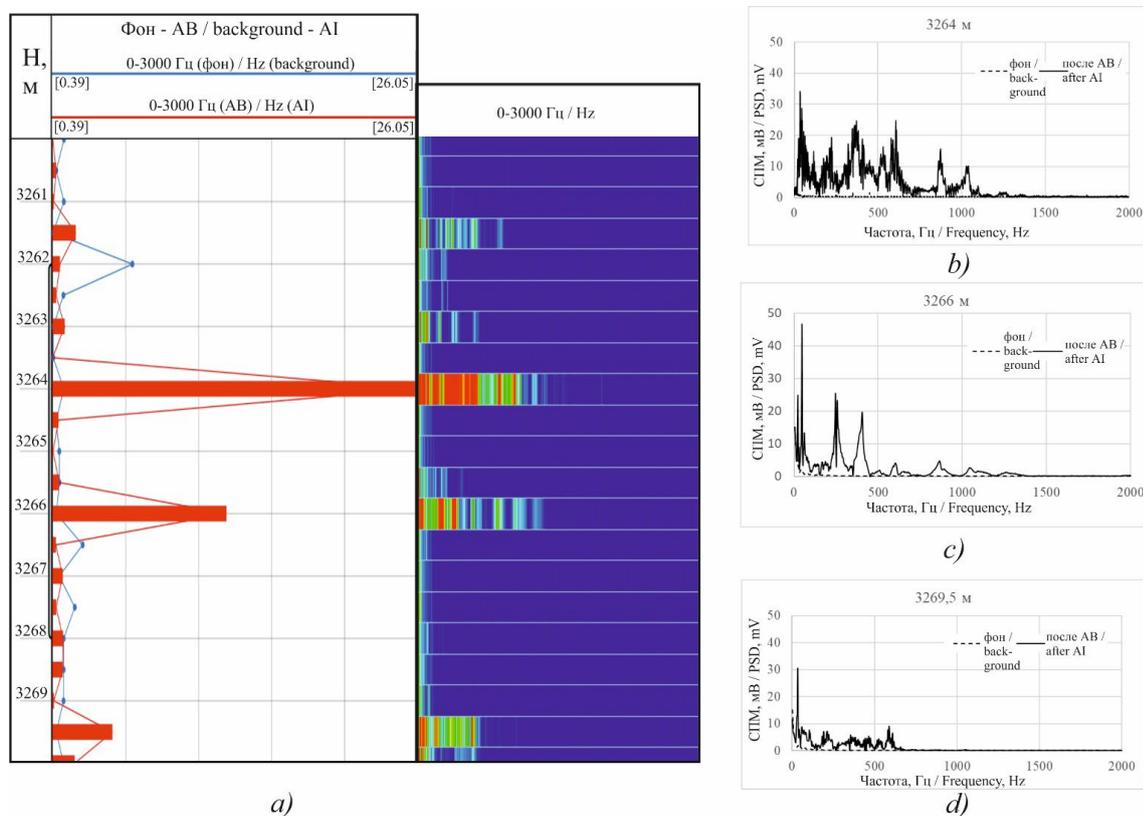


Рис 4. Результаты акустического воздействия (АВ) методом КВК-САЭ в скважине № 54 / Fig. 4. Results of acoustic impact (AI) by the KVK-SAE method in well No. 54

Исследования свидетельствует о том, что АНГКМ является результатом сдвига-сжатия земной коры. К подобному выводу о строении месторождений нефти и газа приходят многие исследователи во всем мире [Grillot, 1984; Mann et al., 2003; McKirdy, 2006; Davison, Barreto, 2009; Saadallah, 2019; Naumann, Sakariassen, 2019; Laudon et al., 2021; Велиев, 2021], в том числе при изучении залежей УВ Предуральского краевого прогиба на территории Российской Федерации [Данилова, 2020; Горожанин, 2011; Горожанина и др., 2008], где породы как в карбонатном, так и в терригенном разрезах в основном имеют низкие фильтрационно-емкостные свойства, а основную полезную их емкость составляют порово-кавернозные пустоты и системы трещин вторичного эпигенетического происхождения [Данилова, 2020; Горожанин, 2011; Горожанина и др., 2008]. Тем не менее, из этих объектов получают фонтанные притоки нефти и газа [Денк, 1992].

Ольховское, Уньвинское и Пихтовое нефтяные месторождения Предуральского краевого прогиба Пермской области также, как и АНГКМ, считаются рифогенными телами. Промышленная нефтегазоносность здесь установлена в карбонатных и терригенных отложениях девона и карбона. Сейсмоакустический метод САЭ доказал свою эффективность в повышении нефтеотдачи пластов при освоении и этих залежей УВ. В результате АВ отмечалось значительное улучшение состояния призабойных зон пластов по мощности работающих пропластков, проницаемости, гидропроводности и коэффициентам продуктивности. Положительный эффект влияния акустического поля на добычные возможности скважин наблюдался и после воздействия в течение 13 месяцев. Средние значения дебита увеличились до 80% [Митрофанов и др., 1998] за счет открытия трещин – каналов фильтрации пластовых флюидов к стволам скважин.

Выводы

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы.

1. Месторождения УВ Восточнороторной нефтегазоносной области Прикаспийской впадины имеют схожее строение с залежами нефти и газа Предуральского краевого прогиба, характеризуются наличием трещинных коллекторов и представляют собой неотектонические структуры «цветка». Это подтверждает новая интерпретация временных разрезов сейсмических профилей, пересекающих АНГКМ. Глубинные и связанные с ними подчиненные «оперяющие» неотектонические разломы экранируют нефтяную и газонефтяную залежи месторождения, делят на блоки и трассируются через толщи КТ-II, МКТ и КТ-II в соли кунгурского яруса нижней перми, образуя пути миграции УВ. В продольном сечении АНГКМ представляет собой сочетание горстов и грабенов, зон растяжения и сжатия земной коры, которые являются следствием сдвиговых деформаций.

2. Исследования методом КВК-САЭ с использованием АВ на пласт подтвердили наличие трещинных коллекторов в нефтяной залежи КТ-II и выявленного по результатам новой интерпретации временных разрезов глубинного разлома в зоне его пересечения со скважиной № 54. Сейсмоакустические исследования способствовали получению идентификационных параметров трещин, которые необходимо использовать для успешного освоения месторождений с аналогичным типом коллектора. Метод КВК-САЭ доказал свою эффективность при увеличении нефтеотдачи пластов, с его помощью можно непосредственно влиять на фильтрационную способность путей миграции УВ.

Литература

1. Алексеев А. С., Геза Н. И., Глинский Б. М., Еманов А. Ф., Кашун В. Н. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. – Новосибирск: Изд-во ИВМ и МГ СО РАН, 2004. – 386 с.
2. Ахияров А. В., Семенова К. М. Палеозойские карбонатные платформы Прикаспийской впадины как нефтегазопроисходительные критерии. // Вести газовой науки, – 2013. – № 5. – С. 238-252.
3. Бакиров К. Х., Курманов С. К., Чимбулатов М. А., Корнеев В. И., Огай Б. А., Чанышев Р. Х., Хабибуллин Э. Г. Вертикальная миграция углеводородов и прогноз крупных перспектив промышленной нефтегазоносности пермотриасового комплекса отложений Прикаспийской впадины. – Алма-Ата: Актюбинск, 1992. – С. 27-74.
4. Велиев Г. О. Роль геодинамического напряжения в формировании нефтегазовых структур в Каспийском море (на примере месторождений Шахдениз, Умид, Бабек, Булладениз). // Геология и геофизика юга России. – 2021. – Т. 11. № 2. – С. 36-50. DOI: 10.46698/VNC. 2021.68.77.003
5. Горожанина Е. Н., Горожанин В. М., Ефимов А. Г., Побережский С. М., Светлакова А. Н. Геологическое строение западной части Предуралья на территории Оренбургской области и структурная позиция нефтегазоносных комплексов. // Геологический сборник № 8. – Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2008. – С. 221-226.
6. Горожанин В. М. Особенности нефтегазонакопления в солянокупольных областях юго-востока Восточно-Европейской платформы. – Современное состояние наук о Земле [Электронный ресурс]. // Материалы международной конференции, посвященной памяти В. Е. Хаина. – 2011. – Режим доступа: <http://khain2011.web.ru>.
7. Дальян И. Б., Посадская А. С. Геология и нефтегазоносность восточной окраины Прикаспийской впадины. – Алма-Ата: Изд-во «Наука» Казахской ССР, 1972. – 99 с.
8. Данилова Е. А. Присдвиговые цветковые структуры юго-запада Оренбургской области. // Региональная геология и металлогения. – 2020. – Т. 82. – С. 60-68.
9. Данилова Е. А. Соляные структуры осадочного чехла Русской платформы как отражение возможных геодинамически активных очагов генерации углеводородов в фундаменте (на примере Оренбургской области). // Геология и геофизика юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 33-44. DOI: 10.46698/VNC. 2021.67.24.003
10. Денк С. О. Карбонатные трещинные коллекторы в Пермском Приуралье. // Геология нефти и газа. – 1992. – № 11. – С. 31-34.
11. Дрягин В. В. Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта. // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59. № 6. – С. 744-751.
12. Исказиев К. О. Проблемы доразведки надсолевых отложений центральной части Прикаспийской впадины. // Oil & Gas journal Russia. – 2018. – № 8 [128]. – С. 42-47.
13. Кузнецов О. Л., Чиркин И. А., Арутюнов С. И., Ризанов Е. Г., Дыбленко В. П., Дрягин В. В. Сейсмические исследования неравномерности открытой трещиноватости и неоднородности флюидонасыщения геологической среды для оптимального освоения месторождений нефти и газа. // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. № 3. Ч. 2. – С. 206-216.
14. Кузнецов О. Л., Дыбленко В. П., Чилингар Дж. В., Садеги К. М., Марчуков Е. Ю., Шарифуллин Р. Я., Чиркин И. А., Симкин Э. М. Колебания и волны во флюидонасыщенных геологических средах. – Москва, Ижевск, Дубна, 2021. – 420 с.
15. Месторождения нефти и газа Казахстана. – Справочник. – Алматы, 1999. – 325 с.
16. Митрофанов В. П., Дзюбенко А. И., Нечаева Н. Ю., Дрягин В. В. Результаты промысловых испытаний акустического воздействия на призабойную зону пласта. // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 1998. – № 10. – С. 29-35.
17. Davison I., Barreto P. Exhumed portuguese oil field suggests conjugate potential. // GEOExPro. – 2019. – pp. 38-40.

18. Grillot J. C. Tectonics of Late and Post-hercynian Ages in the Western of the Iberian Plate (Portugal). // *Comptesrendus de l'académie des sciences.* – 1984. – Vol. 299. – pp. 665-670.
19. Laudon C., Qi J., Rondon A., Rouis L., Kabazi H. An enhanced fault deflection workflow combining machine learning and seismic attributes yields an improved fault model for Caspian Sea asset. // *First break.* – 2021. – Vol. 39. – pp. 53-60.
20. Mann P., Gahagan L., and Gordon M. B. Tectonic setting the world's giant oil and gas fields, in M. T. Halbouty, ed., *Giant oil and gas fields of the Decade 1990-1999.* // *Memoirs of AAPG.* – 2003. – Vol. 78. – pp. 15-105.
21. McKirdy D. M. Hydrocarbon generation and migration. // In: *The Petroleum Geology of South Australia.* – Vol. 2: Eromanga Basin. / Ed. by T. B. Cotton, M. F. Scardigno, J. E. Hibburt. (Dprtm. Primary Industr. Res., Adelaide, South Australia, 2006. 2nd edn. Vol. 2. Ch. 10). – pp. 2–9.
22. Naumann S., Sakariassen R. Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents sea. // *GEOExPro,* june. – 2019. – pp. 20-24.
23. Saadallah A. A proposed new tectonic model for the Northern Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects. // *GEOExPro,* june. – 2019. – pp. 14-18.

References

1. Alekseev A. S., Geza N. I., Glinsky B. M., Emanov A. F., Kashun V. N. Active seismology with powerful vibration sources. Novosibirsk, ICM&MG SB RAS. 2004. 386 p. (In Russ.)
2. Akhiyarov A. V., Semenova K. M. Paleozoic carbonate platforms of the Pre-Caspian depression as oil and gas prospecting criteria. *VestiGazovoiNauki.* 2013. No. 5. pp. 238-252. (In Russ.)
3. Bakirov K. Kh., Kurmanov S. K., Chimbulatov M. A., Korneev V. I., Ogai B. A., Chanyshv R. Kh., Khabibullin E. G. Vertical migration of hydrocarbons and the forecast of major prospects for the commercial oil and gas potential of the Permian-Triassic complex of deposits in the Pre-Caspian depression. Alma-Ata, Aktyubinsk. 1992. pp. 27-74. (In Russ.)
4. Gorozhanina E. N., Gorozhanin V. M., Efimov A. G., Poberezhskii S. M., Svetlakova A. N. Geological structure of the western part of the Cis-Ural trough in the Orenburg region and the structural position of oil and gas bearing complexes. Geological collection No. 8. Ufa, Design Polygraph Service. 2008. pp. 221-226. (In Russ.)
5. Gorozhanin V. M. Peculiarities of oil and gas accumulation in the salt dome areas of the southeast of the East European Platform. The current state of the Earth sciences In: Proc. of the int. conf. dedicated to the memory of V. E. Khain. 2011. <http://khain2011.web.ru>. [access date: 30.08.2022] (In Russ.)
6. Dalyan I. B., Posadskaya A. S. Geology and oil and gas content of the eastern margin of the Pre-Caspian depression. Alma-Ata, Nauka, Kazakh SSR. 1972. 99 p. (In Russ.)
7. Danilova E. A. Shift flower structures of the southwest of the Orenburg region. Regional geology and metallogeny. 2020. Vol. 82. pp. 60-68. (In Russ.)
8. Danilova E. A. Salt structures of the sedimentary cover of the Russian platform as a reflection of possible geodynamically active foci of hydrocarbon generation in the basement (on the example of the southwest of the Orenburg region). *Geology and Geophysics of Russian South.* 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 33-44. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.67.24.003.
9. Denk S. O. Carbonate fractured reservoirs in the Perm Urals. *Geology of oil and gas.* 1992. No. 11. pp. 31-34. (in Russ.)
10. Dryagin V. V. Seismoacoustic emission of an oil reservoir. *AkusticeskijZurnal.* 2013. Vol. 59. No. 6. pp. 744-751. (in Russ.)
11. IskaziyeV K. O. Problems of additional exploration of post-salt deposits in the central part of the Pre-Caspian depression. *Oil & Gas journal Russia.* 2018. No. 8. Issue 128. pp. 42-47. (in Russ.)
12. Kuznetsov O. L., Chirkin I. A., Arutyunov S. I., Rizanov E. G., Dyblenko V. P., Dryagin V. V. Seismic studies of the unevenness of open fracturing and heterogeneity of fluid

saturation of the geological environment for the optimal development of oil and gas fields. *Georesources*. 2018. Vol. 20. No. 3. Part 2. pp. 206-216. (in Russ.)

13. Kuznetsov O.L., Dyblenko V.P., Chilingar J.V., Sadegi K.M., Marchukov E.Yu., Sharifullin R.Ya., Chirkin I.A., Simkin E.M. *Vibrations and waves in fluid-saturated geological media*. Moscow, Izhevsk, Dubna. 2021. 420 p. (in Russ.)

14. *Oil and gas fields in Kazakhstan. Handbook*. Almaty. 1999. 325 p. (in Russ.)

15. Mitrofanov V.P., Dzyubenko A.I., Nechaeva N.Yu., Dryagin V.V. Results of field tests of acoustic impact on the bottom-hole formation zone. *Geology, geophysics and development of oil fields*. 1998. No. 10. pp. 29-35. (in Russ.)

16. Samartsev S.K., Danilova E.A., Dragunov A.A., Dragunov V.A. Geodynamically active centers of hydrocarbon generation as possible sources of replenishment of deposits of the Orenburg oil and gas condensate field. *Drilling and oil*. 2021. No. 4. pp. 10-13. (in Russ.)

17. Davison I., Barreto P. Exhumed portuguese oil field suggests conjugate potential. *GEOExPro*. 2019. pp. 38-40.

18. Grillot J.C. Tectonics of Late and Post-hercynian Ages in the Western of the Iberian Plate (Portugal). *Comptesrendus de l'academie des sciences*. 1984. Vol. 299. pp. 665-670.

19. Laudon C., Qi J., Rondon A., Rouis L., Kabazi H. An enhanced fault defection workflow combining machine learning and seismic attributes yields an improved fault model for Caspian Sea asset. *First break*. 2021. Vol. 39. pp. 53-60.

20. Mann P., Gahagan L., Gordon M.B. Tectonic setting the world's giant oil and gas fields, in M.T. Halbouty, ed., *Giant oil and gas fields of the Decade 1990-1999*. *Memoirs of AAPG*. 2003. Vol. 78. pp. 15-105.

21. McKirdy D.M. Hydrocarbon generation and migration. In: *The Petroleum Geology of South Australia*. Vol. 2: Eromanga Basin. Ed. by T.B. Cotton, M.F. Scardigno, J.E. Hibbert. Dprtm. Primary Industr. Res., Adelaide, South Australia, 2006. 2nd ed. Vol. 2. Ch. 10. pp. 2-9.

22. Naumann S., Sakariassen R. Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents sea. *GEOExPro*, june. 2019. pp. 20-24.

23. Saadallah A. A proposed new tectonic model for the Northern Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects. *GEOExPro*, June. 2019. pp. 14-18.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 549.27:549.283 (470.6)

DOI: [10.46698/VNC.2022.77.74.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.77.74.006)

Оригинальная статья

Перспективы рудоносности лиственитов
Северного Кавказа (Приэльбрусье)И. А. Богуш¹, Г. В. Рябов¹, И. И. Сендецкий², В. И. Черкашин³

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

²Южное территориальное отделение ФГКУ «Росгеолэкспертиза», 344111, г. Ростов-на-Дону, пр-т 40-летия Победы, д. 330;

³Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра Российской Академии наук, Россия, 367030, Республика Дагестан, Махачкала, ул. Ярагского, д. 75, e-mail: dangeo@mail.ru

Статья поступила: 14.06.2022, доработана: 12.07.2022, принята к публикации: 21.07.2022

Резюме: Актуальность работы. Альпинотипные ультрабазиты Северного Кавказа отнесены к региональным продуцентам благородных металлов (Au, Pt, Pd, Os, Ir, Ru, Rh). Продукты разрушения и переработки ультрабазитов (черные сланцы, коры выветривания, базальные горизонты, россыпи) часто содержат аномальные субпромышленные концентрации этих металлов. К дериватам ультрабазитов отнесены приконтактные метасоматиты, представленные лиственитами, талькитами, тальк-карбонатными амфибол-хлорит-карбонатными, кварц-карбонатными, анхикварцевыми и анхикарбонатными породами. Ультрабазитовые дериваты аномально обогащены благородными металлами (Au, Pt, Pd), в ряде случаев представляющими промышленный интерес. Одним из таких ярких представителей дериватов являются листвениты, которые до настоящего времени практически детально не изучены на предмет содержания благородных металлов. **Цель работы.** В основу работ положены исследования лиственитов в рамках изучения металлогении благородных металлов Северного Кавказа с целью определения их пространственной и генетической связи с ультрабазитами, которые локализуются в зоне контакта соприкасающихся рудных полей крупного медноколчеданного Худесского и золоторудного Чучкурского месторождений. **Методы исследования.** Проведен исторический обзор литературных данных на предмет генетического родства и тесной связи лиственитов с ультрабазитами Северного Кавказа, исходно содержащими благородные металлы (Au, Pt, Pd). Результаты исследования базируются на основе изучения существующего каменного материала на предмет определения их состава, геохимическим особенностям и их потенциальной рудоносности. **Результаты работ.** Изучены ореольные листвениты, как наиболее близкие дериваты переработки ультрабазитов, содержащие золото, но совершенно не исследованные на металлы платиновой группы. Непосредственно с 1985 года исследуется поле чучкурских лиственитов Северного Приэльбрусья, примыкающее к крупному эндогенному Чучкурскому месторождению благородных металлов. Выделены геологические, минеральные и геохимические особенности лиственитов. Особое внимание обращено на проявления золота в лиственитах, геохимию и минералогию в сравнении с золотоносными телами андезито-дацитовых пермских вулканитов Чучкурского месторождения. Делается вывод о перспективах комплекса благородных металлов в лиственитах, аналогичного металлам Чучкурского месторождения. Впервые для Северного Кавказа рассматривается благороднометалльная (Au, Pt, Pd) рудоносность лиственитов.

Ключевые слова: Северный Кавказ, металлогения, альпинотипные ультрабазиты, листвениты, благородные металлы, предпосылки рудоносности.

Для цитирования: Богуш И. А., Рябов Г. В., Сендецкий И. И., Черкашин В. И. Перспективы рудоносности листовенитов Северного Кавказа (Приэльбрусье). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 94-106. DOI: 10.46698/VNC. 2022.77.74.006.

===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION =====
OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

[DOI: 10.46698/VNC. 2022.77.74.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.77.74.006)

Original paper

Prospects for the ore content of listvenites in the North Caucasus (the Elbrus region)

I. A. Bogush ¹, G. V. Ryabov ¹, I. I. Sendetskiy ², V. I. Cherkashin ³

¹Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132 Prosveshcheniya, Novocherkassk 346428, Russian Federation,
e-mail: georg. riabov@yandex. ru, i_bogush@mail. ru;

²South local branch of FSPE “Rosgeolekspertiza”, 33040th anniversary of Victory Avenue,
Rostov-on-Don344111, Russian Federation;

³Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, RAS, 75 Yaragskiy Str., Makhachkala
367010, Republic of Dagestan, Russian Federation, e-mail: dangeo@mail. ru

Received: 14.06.2022, revised: 12.07.2022, accepted: 21.07.2022

Abstract: Relevance. Alpine-type ultrabasites of the North Caucasus are classified as regional producers of noble metals (Au, Pt, Pd, Os, Ir, Ru, Rh). Products of destruction and processing of ultrabasites (black shales, weathering crusts, basal levels, placers) often contain anomalous sub-commercial concentrations of these metals. Near-contact metasomatites, represented by listvenites, talcites, talc-carbonate amphibole-chlorite-carbonate, quartz-carbonate, anchiquartz and anchicarbonatite rocks, are classified as ultrabasite derivatives. Ultrabasite derivatives are anomalously enriched in noble metals (Au, Pt, Pd), which in some cases are of industrial interest. One of such brightest representatives of derivatives are listvenites, which practically have not been studied in detail for the content of noble metals by now. **Aim.** The work is based on the study of listvenites in the framework of the study of the metallogeny of the noble metals of the North Caucasus in order to determine their spatial and genetic relationship with ultrabasites, which are localized in the contact zone of ore fields of the large copper-pyrite Khudessky and gold-bearing Chuchkursky deposits. **Methods.** A historical review of the literature data on the genetic relationship and close relationship of listvenites with the ultrabasites of the North Caucasus, which initially contain noble metals (Au, Pt, Pd), has been carried out. The results of the research are based on the study of existing rock material in order to determine their composition, geochemical features and their potential ore content. **Results.** Aureole listvenites have been studied as the closest derivatives of ultrabasite processing, containing gold, but they are completely unexplored for platinum group metals. The field of Chuchkursky listvenites of the Northern Elbrus region, adjacent to the large endogenous Chuchkursky deposit of noble metals, has been explored since 1985. Geological, mineral and geochemical features of listvenites are distinguished. Particular attention is paid to the gold prospect in listvenites, geochemistry and mineralogy in comparison with the gold-bearing bodies of andesite-dacitic Permian volcanic rocks of the Chuchkursky deposit. A conclusion is made about the prospects of a complex of noble metals in listvenites, similar to the metals of the Chuchkursky deposit. For the first time for the North Caucasus, the ore content of listvenites with noble metals is considered.

Keywords: North Caucasus, metallogeny, alpine-type ultrabasites, listvenites, noble metals, prerequisites for ore potential.

For citation: Bogush I. A., Ryabov G. V., Sendetskiy I. I., Cherkashin V. I. Prospects for the ore content of listvenites in the North Caucasus (the Elbrus region). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 94-106. DOI: 10.46698/VNC. 2022.77.74.006.

Введение Постановка проблемы

На Северном Кавказе альпинотипным ультрабазитам принадлежит ведущая роль в продуцировании благородных металлов [Богущ и др., 2021; Гончаров и др., 2005; Михеев, 2011; Парада и др., 2011, 2014; Попов и др., 2021], в настоящее время завоевывающих приоритетное положение в металлогении региона. Ранее авторами было показано, что практический интерес в области благородных металлов представляют продукты разрушения и гидротермальной переработки ультрабазитов, в частности, толщи рудоносных черных сланцев палеозоя [Гончаров и др., 2005]. Алло- и автосоматические преобразования гипербазитов повсеместно сопровождают их тела и, как правило, локализуются в специфических зонах метасоматитов и гидротермалитов. Эти зоны локализуются в виде внешних ореолов вокруг ультрабазитовых массивов, часто представленных тектоническими экзоконтактами [Михеев, Потапенко, 1973; Плошко, 1986; Соболев, 1952; Снежко, 1985], наряду с хромитом и асбестом. Ореольные метасоматиты ультрабазитов, по предложению В. В. Плошко [Плошко, 1986], рассматриваются под названием «полиметасоматоз». Метасоматитами ультрабазитов и их связью с рудной минерализацией зарубежные исследователи активно занимаются с 1980-1990-х годов [Bach et al., 2006; Beziat et al, 1998; Halls et al, 1991; Halls et al, 1995; Grieco, Merlini, 2012; Kimball, 1990]. Продукты полиметасоматоза ультрабазитов Северного Кавказа практически не исследованы, а рудоносность их не оценена. В металлогении Северного Кавказа рудные металлы, генетически связанные с ультрабазитами, представлены осадочными и остаточными железными рудами (Малкинский массив), марганцем, хромом, кобальтом, никелем и благородными металлами [Михеев, Потапенко, 1973; Соболев, 1952]. Метасоматическими процессами образованы гидротермально осветленные серпентиниты – «белые осыпища» Беденского массива – Лебединское (Беденское) месторождение хризотил-асбеста [Татаринов, 1935].

Мотивами для исследования лиственитов и серпентинитов в рамках металлогении благородных металлов Северного Кавказа послужили следующие геологические предпосылки и факты:

- пространственная и генетическая связь серпентинитов и лиственитов, при установленной рудообразующей функции альпинотипных ультрабазитов для благородных металлов [Плошко, 1986];
- благороднометалльная (Au, Pt, Pd) рудоносность продуктов разрушения и гидротермальной переработки ультрабазитов [Черницин, Прокуронов, 1977];
- золотоносность лиственитов, при полном отсутствии анализов на металлы МПП [Богущ и др., 1999, 2021];
- локализация лиственитов в продуктивной толще черных сланцев девона Северного Кавказа [Гончаров и др., 2005];
- приуроченность лиственитов к дорудоносным тектоническим структурам продуктивной киньрчадской свиты Чучкурского месторождения благородных металлов [Сендецкий, 1997];

- локализация лиственитов исключительно в металлоносных черносланцевых толщах девона [Богущ и др., 1999; Гончаров и др., 2005];
- тесная ассоциация лиственитов с рудными черными сланцами Чучкурского месторождения [Богущ и др., 1999].

Объекты исследования

Дериваты альпинотипных ультрабазитов Северного Кавказа – это листвениты. Объектом исследования явился участок лиственитов северо-восточного фланга Чучкурского золоторудного месторождения, ассоциирующихся с группой «худесских» серпентинитов Северного Приэльбрусья (рис. 1). В металлогеническом отношении листвениты пространственно локализуются в зоне контакта соприкасающихся рудных полей крупного медноколчеданного Худесского месторождения (возраст D_2) и золоторудного Чучкурского месторождения (P_1). Оба месторождения залегают в толще офиолитовой формации палеозоя металлогенической зоны Передового хребта в зоне влияния Северного разлома глубинной Тырнауз-Пшекишской шовной зоны [Снежко, 1985; Черницин, Прокуронов, 1977].

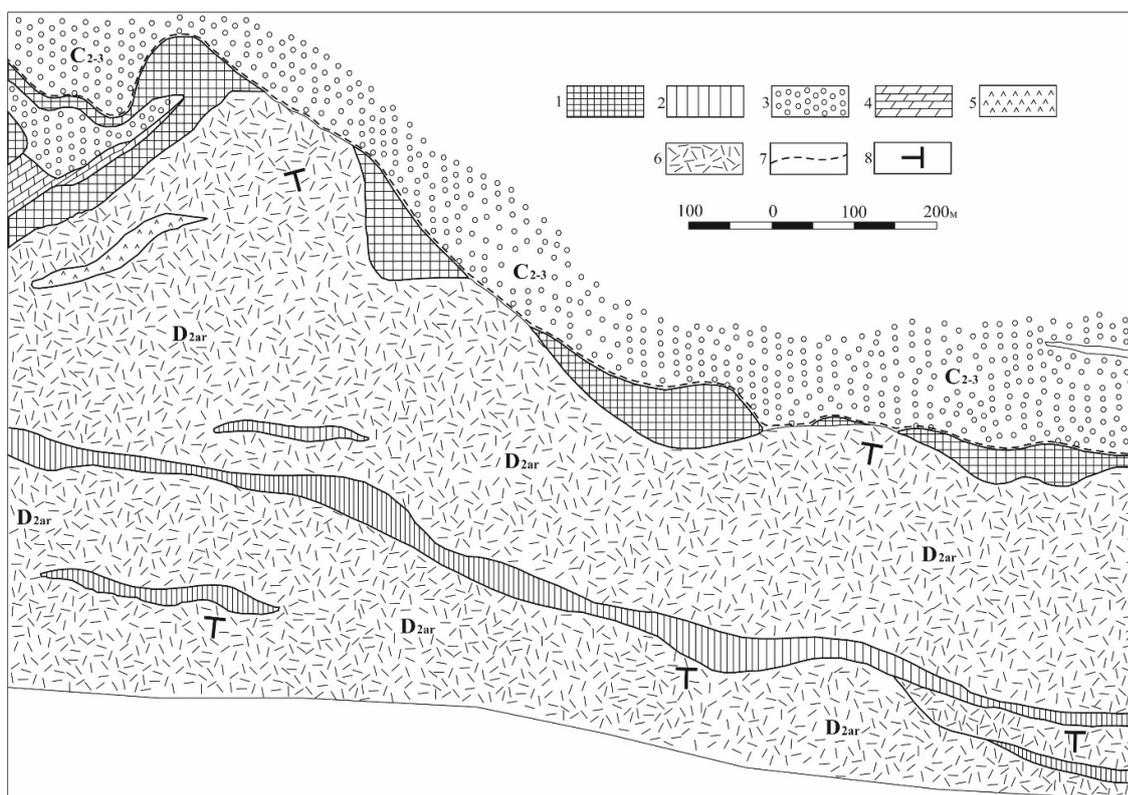


Рис. 1. Схематическая геологическая карта чучкурских лиственитов.

Составлена с использованием материалов В.Л. Омельченко, И.И. Сендецкого, В.С. Исаева.

Условные обозначения: 1 – серпентиниты Худесской группы; 2 – листвениты; 3 – конгломератовидные песчаники и гравелиты C_{2-3} ; 4 – известняки; 5 – андезиты; 6 – филлиты (черносланцевая толща D_{2ar}); 7 – разломы; 8 – залегание пород /

Fig. 1. Schematic geological map of the Chuchkursky listvenites. Compiled using the materials from

V.L. Omelchenko, I.I. Sendetsky, V.S. Isaev.

Legend: 1 – serpentinites of the Khudessky group; 2 – listvenites; 3 – conglomerate sandstones and gravelstones C_{2-3} ; 4 – limestones; 5 – andesites; 6 – phyllites (black shale layer D_{2ar}); 7 – faults; 8 – bedding of rocks

Генетическое родство и тесная ассоциация лиственитов с ультрабазитами Северного Кавказа, исходно содержащими благородные металлы (Au, Pt, Pd) [Константинов, 1984], привлекли наше внимание в общей проблеме благородных металлов на Кавказе. Зоны лиственитизации в качестве специфических гидротермальных образований сопровождают тела ультрабазитов и залегают повсеместно с ультрабазитами в пределах металлоносной черносланцевой толщи артыкчатской свиты среднего девона (D_{2-3} ar), поскольку в более поздних породах они не встречаются. Наиболее крупными и изученными являются Чучкурские листвениты северо-восточного фланга этого золоторудного месторождения. Геологическими исследованиями на западном фланге Худесского рудного узла А. Л. Луневым, Л. И. Яковлевым (ЦНИГРИ), В. Л. Омельченко (Чемарткольская ПСП) в 1961 году была открыта и обследована на золото мощная и протяженная зона лиственитов района Чучкурского перевала. В это же время В. Л. Омельченко отметил в балке Лесной левого борта реки Чучкур точку с содержанием золота 1 г/т в пиритизированных породах. Последующими 30-тилетними минералогическими и геохимическими работами эта точка была поэтапно доведена до крупного золоторудного Чучкурского месторождения, единственного на Северном Кавказе [Богущ и др., 2021]. Авторами (И. А. Богущ, И. И. Сендецкий) в 1997 году установлена золотоносность лиственит-березитовой формации, отнесенной к Чучкурскому рудному полю [Богущ и др., 1999].

Зона лиственитизации расположена на гребне водораздела рек Чучкур и Худес, локализуясь исключительно в черносланцевой толще девона Передового хребта. Выклинка восточного фланга зафиксирована в районе Чучкурского перевала. Западный фланг упирается в красноцветные вулканиты пермского возраста, слагающие г. Чуммурлы (рис. 1). Зона имеет субширотное простирание и протягивается на 3 км. В 1963 году Чемарткольской ПСП были проведены площадные поиски масштаба 1:5000 с проведением легких горных выработок, результатом стала отрицательная его оценка на возможность нахождения руд с промышленным содержанием металлов. Однако, проведенные геологами Новочеркасского государственного технического университета в 1994-1998 гг. исследования зоны лиственитизации, позволяют по-иному оценить перспективы данного объекта.

Зона лиственитизации приурочена к крупной региональной структуре – Северному тектоническому шву, который ограничивает с севера структуры Передового хребта, надвинутые на основание Кавказа. Линзовидные субвертикальные тела серпентинитов мощностью от 10 до 70 м располагаются широтно, вытянутой цепочкой в крупной тектонической зоне, расположенной севернее лиственитов, в контакте между сланцами артыкчатской свиты и конгломератами карбона. Протяженность отдельных линз колеблется в пределах 45-300 м. Серпентиниты – плотные, зеленовато-серые, рассланцованные, с многочисленными мелкими зернами скольжения. В контактах с дайками фельзитов отмечается интенсивная эпидотизация с редкой вкрапленностью хромита.

Лиственитовая полоса протяженностью до 15 км расположена в черных сланцах, алевролитах и песчаниках артыкчатской свиты (D_{2-3} ar). Черносланцевая региональная тоханская толща девона изучена и описана авторами в ряде публикаций в связи с ее высокой потенциальной продуктивностью благородными металлами [Богущ и др., 2021; Гончаров и др., 2005]. Тоханская серия, имеющая исходно глинистый состав с незначительным объемом вулканогенных и псаммитовых пород, испытала зеленокаменный метаморфизм (филлиты). Но при господствующем по-

ложении пелитовых пород (85-88%) в составе тоханской серии участвуют алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты, кремнистые, карбонатные, туфогенные прослои, согласные и секущие тела вулканогенных и жильных магматических пород.

Методы исследований

В связи с достаточно длительной историей изучения листовенитов проведен обзор литературных данных на предмет генетического родства и тесной связи листовенитов с ультрабазитами Северного Кавказа, исходно содержащими благородные металлы (Au, Pt, Pd). Также были использованы результаты многолетних полевых исследований авторов, изучения собранного каменного материала с определением состава пород, исследования их геохимических особенностей и потенциальной рудоносности.

Результаты работы и их обсуждение

Девонские черносланцевые толщи в разрезе свиты представлены серыми и темно-серыми разновидностями от тонкослоистых до листовато-слоистых, обладающих пелитовой, алевролитовой и чешуйчатой структурами. Песчаники встречаются в виде мелких линзовидных пропластков. Более крупные пласты (мощностью до 50 м) обнажаются вблизи Чучкурского перевала. Также вблизи Чучкурского перевала встречаются мраморизованные известняки – светло-серые породы крупно-среднезернистые, слоистые, сильно трещиноватые. Интрузивные образования представлены небольшими телами серпентинитов и серией даек андезитовых порфиритов и фельзитов.

Севернее свиты черных сланцев залегает свита конгломератов и песчаников среднего-верхнего карбона (C₂₋₃). Свита сложена чередующимися пластами мощностью 15-20 м кварцевых конгломератов, гравелистых песчаников с отдельными линзовидными пропластками глинистых сланцев. Она имеет тектонический контакт как с нижележащими отложениями артыкчатской свиты, так и с песчано-глинистыми породами нижней юры.

Интрузивные образования представлены небольшими телами серпентинитов и серией даек андезито-дацитовых порфиритов и фельзитов, а также малыми интрузиями гранит-порфиров (гранитоидов).

Дайки золоторудных андезито-дацитовых порфиритов (гранодиоритов) распространены исключительно в свите сланцев (D₂₋₃ar). Крупные тела даек (мощностью до 40 м) сопровождают листовениты на западном фланге Чучкурской зоны, где они слагают массив горы Чуммурлы (Чучкурское рудное поле). Общая мощность лавовой толщи составляет 350-400 м. На восточном же фланге встречаются обособленные маломощные тела.

Гранодиориты – темно-зеленые, свежие, сильно трещиноватые породы с порфировой структурой с офитовой и пилотакситовой основной массой. Крупные вкрапленники (до 1 см) представлены андезитом, реже альбит-олигоклазом, пироксенами и амфиболом. Основная масса, состоящая из тех же минералов, в значительной степени хлоритизирована. В участках окварцевания, хлоритизации и пиритизации гранодиориты переработаны в золотоносные березиты, широко распространенные в рудном поле Чучкурского золоторудного месторождения. Характеристика химического состава гранодиоритов приведена в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Химический состав гранодиоритов Чучкурского месторождения ($n \times 10^{-3} \%$) /
Chemical composition of granodiorites of the Chuchkursky deposit ($n \times 10^{-3} \%$)**

№ образца / № of sample	Химические элементы / Chemical elements										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
0,23/1	57,0	15,1	1,22	1,72	5,05	0,26	0,09	2,20	4,4	2,4	3,25
0,29/1	54,2	13,3	1,02	1,83	3,65	0,20	0,18	3,05	6,03	2,18	3,8
0,39/1	58,1	15,5	1,11	3,39	3,14	0,13	0,13	3,93	2,83	2,70	3,28
0,42/1	52,9	14,4	0,45	2,03	2,31	0,1	0,3	1,7	2,19	2,0	4,7

Микроскопически порода имеет порфировидную структуру. Порфиновые вкрапления представлены темноцветными минералами и плагиоклазом интенсивно серицитизированным, погруженными в гипидиоморфнозернистую основную массу. В основной массе плагиоклазы более свежие чем, в порфиновых вкраплениях. Темноцветные минералы (до 3-5%) идиоморфной формы, иногда образуют скелетные формы. Они практически нацело замещены хлорит-карбонатным агрегатом. В темноцветных порфирах отмечается отдельные вытянутые зерна рудного минерала (рутил –?). Кроме плагиоклаза (№ 38-40) в основной массе встречаются зерна кварца и хлорит-карбонатный агрегат. Из аксессуарных минералов наблюдается апатит (до 0,3-0,5 мм). Вблизи контакта с лиственитами гранодиориты сильно карбонатизированы и серицитизированы, часто содержат прожилки карбоната с рассеянной вкрапленностью пирита. Простираание даек обычно субпараллельно зоне лиственизации, т. е. субширотное, с углами падения 30-70° к югу или к северу.

Малые интрузии гранитоидов тесно ассоциируют с телами лиственитов, локализуясь в однотипных тектонических зонах. Породы светло-серого цвета с розовым оттенком, в них отмечается окварцевание и сильная трещиноватость. Вкрапления представлены калиевым полевым шпатом, плагиоклазами, а также псевдоморфозами хлорита и рудного минерала по темноцветному минералу. Основная масса мелкозернистая, кварц-полевошпатовая.

Листвениты – плотные мелкозернистые, массивные и брекчиевидные породы желтовато-серого до темно-серого цвета. Брекчиевидность обусловлена наличием густой сети прожилков белого кальцита. Кроме них встречаются также гнейсовидные листвениты с многочисленными прожилками белого кальцита. Это мелко-среднезернистые породы, темно-серого цвета, сильно трещиноватые. Гнейсовидность обусловлена чередованием тонких полос, сложенных светлым карбонатом и сильно окварцованными алевролитами темно-серого цвета

Микроскопически листвениты представляют собой породу с брекчиевой текстурой, и состоит из обломков кремнисто-карбонатного состава, которые цементируются карбонат-кварцевым цементом. Микроструктура лиственитов зернистая, гранобластовая. Порода состоит из неправильных изометричных зерен карбоната (до 57%), кварца (до 15%), халцедона (до 7%) и рудного минерала (до 1%). Размер зерен колеблется от 0,08 до 1,2 мм. По оптическим характеристикам карбонат – магнетит. Вокруг некоторых обломков кварц нарастает в виде удлиненных мелко-среднешестоватых кристаллов, образуя венцовую структуру. Обломки представляют собой прожилково-ячеистый агрегат, в котором прожилки выполнены Fe-карбонатом

(анкеритом), а ячейки выполнены кварц-серицитовым и серпентин-тальковым агрегатами. Местами присутствуют единичные оскольчатые зерен бурой хромшпинели (до 0,3 мм).

Рудная минерализация развита в виде мелких зерен и агрегатов сульфидов и магнетита. Сульфидная вкрапленность образует шпировые участки в лиственитах. Халькопирит наблюдается в форме мелких ксеноморфных зерен, частично замещающих и корродирующих зерна пирита. Пирит кристаллически зрелый с размерами зерен до 0,1 до 0,6 мм. Магнетит отмечается также в виде вкрапленников от 0,001 до 0,1 мм. Содержание по отдельным аншлифам достигает – халькопирита до 5%, пирита до 1%, магнетита до 10%. Гарниерит встречается чаще и пользуется более значительным развитием, чем сульфиды. Повышенные концентрации этого минерала наблюдаются на западном фланге и в центральной части западного тела лиственитов. Он представлен тонкочешуйчатым агрегатом, реже землистыми массами, образующими мелкие (до 1-2 см) прожилки и гнезда, более или менее равномерно насыщающие листвениты. Среднее содержание гарниерита в лиственитах примерно 3-5%, в редких случаях до 10-15%.

Геохимические исследования проводились И. И. Сендецким с использованием стандартных методик [Сендецкий, 1997]. Пробы отбирались методом пунктирной борозды, длина проб – от 1 до 5 м. Анализировались пробы на 30 элементов (Au, Cu, Zn, Pb, Ag, Bi, As, Sb, Sn, Mo, W, Ba, Co, Ni, Mn, Ti, V, Cr, Ta, Ga, Ge, P, Sr, Be, Y, It, Zr, Nb, Sc, B). По данным спектрального анализа отмечаются повышенные содержания никеля – 0,1-0,3%, в единичных пробах – до 1,5%, кобальта – 0,003-0,03%, в отдельных пробах – до 0,1-0,2%. В целом средние содержания отдельных элементов, подчеркивающих связь с ультрабазитами, по 3-м опробованным участкам приведены в таблице 2.

Для изучения геохимических ассоциаций был произведен корреляционный анализ между всеми 30-ти элементами (Au, Cu, Zn, Pb, Ag, Bi, As, Sb, Sn, Mo, W, Ba, Co, Ni, Mn, Ti, V, Cr, Ta, Ga, Ge, P, Sr, Be, Y, It, Zr, Nb, Sc, B).

На корреляционной дендрограмме, построенной в ходе анализа геохимических спектров, отчетливо выделяется 4 геохимические ассоциации:

1) ассоциация 1 – группа элементов литофилов Ti-Sr-V-Y-P-Zr-Nb-Be-Sn. Это элементы раннемагматические. Они концентрируются в минералах магнетит, хромшпинель, циркон, апатит и других аксессуариях. Ассоциация связана с первичными породами, превращенными в серпентиниты;

Таблица 2 / Table 2

**Геохимические особенности западного тела лиственитов ($10^{-3}\%$) /
Geochemical features of the western body of listvenites ($10^{-3}\%$)**

Элемент / Element	Западный фланг / Western flank			Центральный блок / Central block			Восточный блок / Eastern block		
	$X_{\text{сред.}} / X_{\text{aver}}$	X_{min}	X_{max}	$X_{\text{сред.}} / X_{\text{aver}}$	X_{min}	X_{max}	$X_{\text{сред.}} / X_{\text{aver}}$	X_{min}	X_{max}
Ni	0,243	0,015	0,400	0,143	0,060	0,300	0,275	0,200	0,300
Co	0,018	0,001	0,030	0,010	0,003	0,030	0,019	0,010	0,030
Cr	0,064	0,030	0,200	0,015	0,000	0,030	0,125	0,100	0,150
Mn	0,315	0,100	1,500	0,512	0,200	1,500	0,625	0,200	1,000

2) ассоциация 2 – Cu-Ni-Co, типоморфна для ультраосновных пород и связанных с ними рудных образований. В этой ассоциации наиболее тесную связь имеют элементы Co-Ni, в меньшей степени Cr, а также Cu-Ba. Это – ассоциация оруденения, сопутствующего ультраосновным породам;

3) ассоциация 3 – W-Sb-Sc-B, характеризует редкометалльную высокотемпературную группу наложенных процессов, переходных к березитовой формации, связанных со становлением даечных комплексов диоритовых порфиритов;

4) ассоциация 4 – Zn-Pb, в меньшей степени As, Mn, Mo. К данной ассоциации приурочено и золото. Характеризует наложенные низко-среднетемпературные метасоматические процессы.

Повышенные содержания золота, по данным геолого-геохимического картирования, отмечаются в сильно окварцованных лиственитах вблизи контакта с диоритовыми порфиридами, а также в эндоконтакте порфиритов с лиственитами. Жильные диоритовые порфириды и гранодиориты в Чучкурском месторождении обогащены золотом и относятся к рудным образованиям. Такой результат получен как геологическими методами, так и при математическом моделировании с использованием R-факторного метода главных компонент.

При моделировании изучались первые три главные компоненты, суммарная дисперсия которых составляет около 56%, из которых наиболее показательны 1-я и 3-я главные компоненты, их вклад в дисперсию соответственно составляет 32% и 11%.

Первая главная компонента служит линейной комбинацией двух групп элементов (нагрузки, представленные значимыми показателями): с положительным знаком – Ga (0,92), Ti (0,89), I (0,83), Sn (0,81), Ta (0,80), V (0,76), Bi (0,75), Sc (0,73), It (0,72), Be (0,71), P (0,69), W (0,66), Nb (0,62), Zr (0,60), Sb (0,53), B (0,47), As (0,44); с отрицательным – Co (-0,53) и Ni (-0,47).

Третья главная компонента представлена линейной комбинацией также двух групп элементов: с положительным знаком – W (0,50) и Au (0,40), с отрицательным – Ni (-0,71), Cr (-0,64), Cu (-0,62), Co (-0,59), Ag (-0,55), Ba (-0,51).

Содержание первой главной компоненты обусловлено комплексом элементов, определяющих гидротермальный процесс лиственитизации, который сопровождался привнесением редкометалльной и литофильной групп элементов (Ga, Ti, V, Bi, Be и др.) и выносом элементов Ni, Co, генетически связанных с ранним ультраосновным магматизмом.

Третья главная компонента характеризует две взаимно исключаящие группы рудообразующих элементов, из которых одна связана с наложенной золото-вольфрамовой минерализацией, пространственно обусловленной наличием жильных тел кварцевых диоритов, а вторая – с первичной Cr-Ni-Co группой.

Данные геологического исследования и математического моделирования позволили тело лиственитов разбить на 4-е блока (рис. 2).

1) зона А – слабо золотоносные листвениты западного фланга рудопроявления, пространственно, приуроченные к маломощной дайке диоритовых порфиритов;

2) зона В – золотоносные листвениты большой мощности (раздвиг тела) с содержаниями Au до 0,1 г/т, связанные пространственно как с маломощной дайкой, так и штокообразным телом кварцевых диоритов, расположенных в центральной части;

3) зона С – слабозолотоносные листвениты восточного фланга рудопроявления, уровень золотоносности падает от центральной части на восток до нуля с увеличением расстояния от дайки и штокообразного тела кварцевых диоритов;

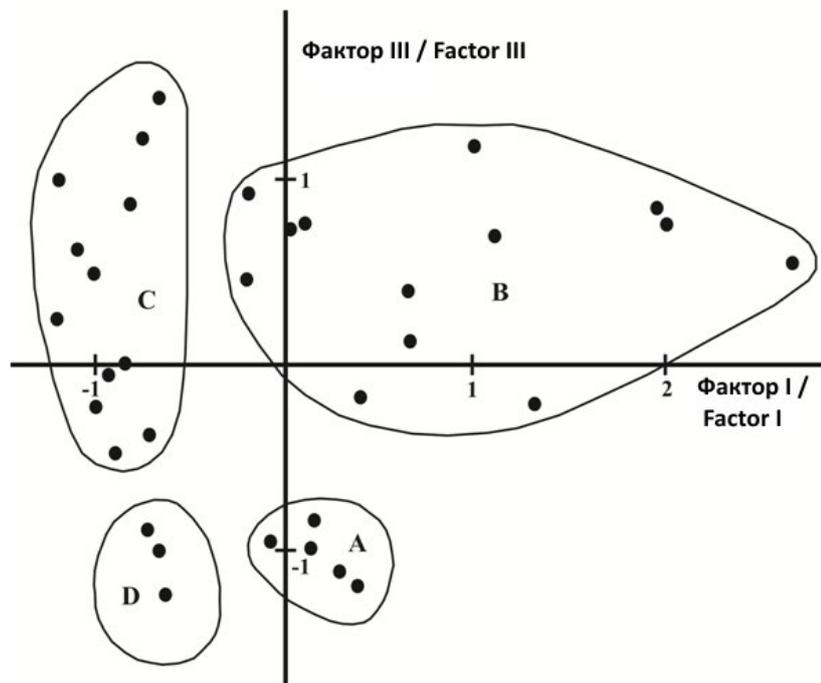


Рис. 2. Диаграмма группировки проб лиственитов по геохимическим данным в координатах I и III главных компонент (A, B, C, D – зоны группирования проб) /
 Fig. 2. Diagram of grouping of samples of listvenites according to geochemical data in coordinates I and III of the main components (A, B, C, D – zones of grouping of samples)

4) зона D – структурно оторванный фрагмент выходов практически не золотоносных лиственитов, пространственно разобщенный с кварцевыми диоритами.

Минералогический анализ не показал видимого золота в лиственитах, однако геохимический анализ показывает содержание золота в лиственитах до 1 г/т. Такие содержания золота в отдельных пробах, определенные спектрометрическим методом, могут доказывать только присутствие золота, но не его содержание. Аналогичная золотоносность одной пробы в балке Лесной позволила выявить крупное Чучкурское месторождение.

Доказанная нами зона лиственитизации является лишь фрагментом крупного регионального геологического тела, вытянутого вдоль северного тектонического шва по границе геолого-структурной зоны Передового хребта. Однако металлогения данного геологического тела практически не изучена, имеются только отдельные сведения, которые носят противоречивый характер.

Пространственное сочетание зон березитизации и лиственитизации в едином рудном поле Чучкурского месторождения подчеркивает наличие на Северном Кавказе перспективной лиственит-березитовой золотоносной ассоциации гидротермалитов [Богущ и др., 2021; Гончаров и др., 2005; Сендецкий, 1998].

Выводы

Учитывая региональный характер распространения зон лиственитизации в описываемых структурах, а также их повышенную золотоносность и наличие кобальт-никелевого оруденения представляется необходимым провести дополнительные исследования данного комплексного вида полезного ископаемого в двух направлениях:

1 – региональный анализ распространения и структурного контроля зон лиственитизации;

2 – детальное исследование отдельных зон развития лиственитов с привлечением минералогического картирования, геохимических исследований, для выявления промышленных концентраций как золотого, так и кобальт-никелевого оруденения.

Кроме того, учитывая современные требования рационального и комплексного использования природных ресурсов, при проведении указанных выше исследований необходимо изучить попутные нетрадиционные компоненты руд такие как: хром, марганец и элементы группы платины. Сами горные породы – листвениты и серпентиниты, по предварительному изучению текстур и структур, блочности и декоративным характеристикам являются качественным камнецветным материалом.

Литература

1. Богуш И. А., Гайдуков В. Д., Сендецкий И. И. Геологические позиции золотоносных лиственитов Чучкурского рудного поля Северного Кавказа. // *Материалы 2-й Международной конференции «Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии Юга России и Кавказа»*. Т. 1. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 1999. – С. 129-132.

2. Богуш И. А., Рябов Г. В., Черкашин В. И., Исаева Н. А. Ультрабазиты и источник благородных металлов (Au, Pt, Pd) на Северном Кавказе. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 15-26. DOI: 10.46698/VNC. 2021.71.47.002

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

4. Константинов М. М. Генетические системы золоторудных месторождений. // *Доклады АН СССР*. – 1984. – Т. 275. №3. – С. 696-699.

5. Михеев Г. В., Потапенко Ю. Я. О возрасте альпинотипных ультрабазитов Северного Кавказа. // *Сов. Геология*. – 1973. – №1. – С. 131-138.

6. Парада С. Г., Маркин М. Ю., Холодов Ю. В., Шишкалов И. Ю. Минерагенические аспекты геохимических исследований Малкинского рудного района. // *Вестник Южного научного центра РАН*. – 2011. – Т. 7. №1. – С. 47-78.

7. Парада С. Г., Маркин М. Ю., Столяров В. В., Шишкалов И. Ю. Первые химико-аналитические данные о платиноносности Беденского серпентинитового массива (Карачаево-Черкесская Республика). // *Доклады РАН*. – 2014. – Т. 454. №5. – С. 567-569.

8. Плошко В. В. Гипербазиты Карпато-Крымско-Кавказской складчатой области. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 192 с.

9. Попов Ю. В., Пустовит О. Е., Никулин А. Ю. Минеральный состав серпентинитов Кишинского массива (Большой Кавказ). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 38-51. DOI: 10.46698/VNC. 2021.91.98.004

10. Сендецкий И. И. Петрохимические особенности вулканитов киньрчадской свиты Кубань-Малкинского междуречья. // *Проблемы геологии и экологии Юга России и Кавказа. Материалы международной научной конференции*. Т. 1. *Геология, полезные ископаемые*. – Новочеркасск. – 1997. – С. 108-110.

11. Соболев Н. Д. Ультрабазиты Большого Кавказа. – М.: Госгеолиздат, 1952. – 240 с.

12. Снежко Е. А. Петрохимические типы ультрабазитов Северного Кавказа и их структурная позиция. // *Рукопись деп. в ВИНТИ*. – М.: ВИНТИ, 1985. – Деп. рук. № 7884-85. – 162 с.

13. Татаринов П. М. Лебединское (Беденское) месторождение хризотил-асбеста на Северном Кавказе. // *Материалы ЦНИГРИ*. – 1935. – Сб. 2. – С. 1-26.

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

15. Bach W., Paulick H., Garrido C.J., Ildefonse B., Meurer W., Humphris S.E. Unravelling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15°N (ODP Leg 209, Site 1274). // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – Vol. 25. – pp. 1467-1470.

16. Beziat D., Bourges F., Débat P., Lompo M., Tollon F., Zonou S. Albitite et “listvenite”; sites de concentration aurifère inédits dans les ceintures de roches vertes birimiennes fortement hydrothermalisées du Burkina Faso. // *Bull. Soc. Geol. France, H. Ser.* – 1998. – Vol. 169. No. 4. – pp. 563-571.

17. Halls C., Zhao R. Listvenite and related rocks: A perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland. // *Mineral. Deposita*. – 1995. – Vol. 30. No. 2. – pp. 303-313.

18. Halls C., Zhao R., Shine C., Cooper C., Harrington K. Listvenites and related rocks associated with gold mineralization in Co. Mayo, Ireland. // *Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. Winter Conference, Cardiff, December 16-18 1991.* – Industrial and Environmental Mineralogy, Programme and Abstracts. – 1991. – 25p.

19. Grieco G., Merlini A. Chromite alteration processes within Vourinosophiolite. // *Int. J. Earth Sci.* – 2012. – Vol. 101. – pp. 1523-1533.

20. Kimball K.L. Effects of hydrothermal alteration on the compositions of chromian spinels. // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1990. – Vol. 105. – pp. 337-346.

References

1. Bogush I.A., Gaidukov V.D., Sendetsky I.I. Geological positions of gold-bearing listvenites of the Chuchkur ore field of the North Caucasus. In: *Proceedings of the 2nd International Conference Prob. of Geol., Min. Res. and Ecol. of the South of Russia and the Caucasus*. Vol. 1. Novocherkassk, YuRGTU NPI, 1999. pp. 129-132. (In Russ.)

2. Bogush I.A., Ryabov G.V., Cherkashin V.I., Isaeva N.A. Ultrabasites and the sources of noble metals (Au, Pt, Pd) in the North Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 15-29. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC. 2021.71.47.002.

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

4. Konstantinov M.M. Genetic systems of gold deposits. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR*. 1984. Vol. 275. No. 3. pp. 696-699. (in Russ.)

5. Mikheev G.V., Potapenko Yu. Ya. The age of alpine-type ultramafic rocks of the North Caucasus. *Soviet Geology*. 1973. No. 1. pp. 131-138. (in Russ.)

6. Parada S.G., Markin M. Yu., Kholod Yu.V., Shishkalov I. Yu. Mineragenic aspects of geochemical investigations of the Malka ore area. *Bulletin of the SSC RAS*. 2011. Vol. 7. No. 1. pp. 47-78. (in Russ.)

7. Parada S.G., Markin M. Yu., Stolyarov V.V., Shishkalov I. Yu. The first chemical-analytical data on the platinum-bearing potential of the Beden serpentinite massif, Karachai-Cherkesiya. *Doklady Earth Sciences*. Vol. 454. No. 2. 2014. pp. 128-130. DOI: 10.1134/S1028334X14020147

8. Ploshko V.V. Hypermafic rocks of the Carpatho-Crimean-Caucasian folded region. Kyiv, *Naukova Dumka*. 1986. 192 p. (in Russ.)

9. Popov Yu.V., Pustovit O.E., Nikulina A. Yu. Mineral composition of serpentinites of the Kishinsky massif (Greater Caucasus). // *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 38-51. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC. 2021.91.98.004

10. Sendetsky I.I. Petrochemical features of volcanic rocks of the Kinyrchad Formation of the Kuban-Malka interfluvium. In: *Proceedings Prob. of geol. and ecol. of the South of Russia and the Caucasus*. Vol. 1. Geology, minerals. Novocherkassk. 1997. pp. 108-110. (in Russ.)

11. Sobolev N.D. Ultramafic rocks of the Greater Caucasus. Moscow. Gosgeolizdat. 1952. 240 p. (in Russ.)

12. Snezhko E. A. Petrochemical types of ultramafic rocks of the North Caucasus and their structural position. In: Manuscript dep. at VINITI. Moscow. VINITI. 1985. Deposited manuscript No. 7884-85. 162 p. (in Russ.)
13. Tatarinov P. M. Lebedinskoye (Bedenskoye) deposit of chrysotile-asbestos in the North Caucasus. Materials of TsNIGRI. 1935. Col. 2. pp. 1-26. (in Russ.)
14. Chernitsin V. B., Prokuronov P. V. Metallogenic specialization of the Pshkish-Tyrnyauz deep fault (Greater Caucasus). *Geology of ore deposits*. 1977. No. 2. pp. 115-118. (in Russ.)
15. Bach W., Paulick H., Garrido C. J., Ildfonse B., Meurer W., Humphris S. E. Unravelling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15°N (ODP Leg 209, Site 1274). *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 25. pp. 1467-1470.
16. Beziat D., Bourges F., Débat P., Lompo M., Tollon F., Zonou S. Albitite et "listvenite"; sites de concentration aurifere inédits dans les ceintures de roches vertes birimiennes fortement hydrothermalisées du Burkina Faso. *Bull. Soc. Geol. France, H. Ser.* 1998. Vol. 169. No. 4. pp. 563-571.
17. Halls C., Zhao R. Listvenite and related rocks: perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland. *Mineral. Deposita*. 1995. Vol. 30. No. 2. pp. 303-313.
18. Halls C., Zhao R., Shine C., Cooper C., Harrington K. Listvenites and related rocks associated with gold mineralization in Co. Mayo, Ireland. *Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. Winter Conference, Cardiff, December 16-18 1991. Industrial and Environmental Mineralogy, Programme and Abstracts*. 1991. 25p.
19. Grieco G., Merlini A. Chromite alteration processes within Vourinosophiolite. *Int. J. Earth Sci.* 2012. Vol. 101. pp. 1523-1533.
20. Kimball K. L. Effects of hydrothermal alteration on the compositions of chromian spinels. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1990. Vol. 105. pp. 337-346.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 551.435 (470.61).6135

DOI: [10.46698/VNC.2022.86.44.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.86.44.007)

Оригинальная статья

Реконструкция рельефа и обстановки
седиментации в бассейне угленакопления
(на примере Восточного Донбасса)А. В. Мохов 

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», Россия, 344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: mochov@ssc-ras.ru; mokhov_av@mail.ru

Статья поступила: 08.06.2022, доработана: 08.07.2022, одобрена в печать: 19.07.2022

Резюме: Статья посвящена выявлению морфологии, происхождения, трансформации палеорельефа территории среднекаменноугольного угленакопления в западной части Восточного Донбасса. **Актуальность исследований** определяется необходимостью разработки научных основ угленакопления для определения промышленной ценности и прогнозирования минерагенических перспектив территорий. **Цель исследований.** Совершенствование теории угленакопления и первичного структурообразования в осадочных формациях в целом. **Методы исследований.** Вещественно-структурный анализ и сравнение пересекающихся геологических разрезов угленосной территории западной части Восточного Донбасса известными литолого-структурными методами, сопоставление геологических разрезов. **Результаты исследований.** Реконструкция рельефа выполнена на основе анализа и сравнения пересекающихся палинспастических геологических разрезов угленосной свиты C_2^5 башкирского яруса среднего отдела каменноугольной системы в западной части Восточного Донбасса. Породный массив исследован в интервале разреза между слоями известняков K_3 и K_6^3 мощностью около 450-500 м. Свита сложена в основном обломочными и глинистыми отложениями дельты палеореки, переслаиваемыми телами морских известняков биогенно-хемогенного происхождения. В основании угольных тел распространены горизонты палеопочв. Развита пологие выпуклые и вогнутые чашевидные изгибы слоев, вытянутые в субмеридиональном направлении. В ядрах вогнутых складок распространены линзы песчаников и известняков. Ядра выпуклых изгибов сложены констративным русловым аллювием. Изгибы являются нетектоническими складками облекания и копируют рельеф местности. Их существование служит признаком формирования прямого палеорельефа бассейна угленакопления. Морфология и размеры изгибов слоев имеют те же характеристики, что и копируемые элементы рельефа. Возвышенности и ложбины палеорельефа имеют субмеридиональное простираие. Наиболее крупные палеовозвышенности имели вдоль трассы субширотного разреза ширину до 15 км, относительную высоту около 50 м. Ширина ложбин сопоставима, их глубина – обычно до 25 м. Уклон поверхности – обычно до 0.45° . Повторение изгибов палеоповерхности на нескольких стратиграфических уровнях указывает на трансляцию очертаний крупнейших элементов рельефа и гидросети во времени. Известняки накапливались в ложбинах при ингрессиях, при больших трансгрессиях моря – в виде площадных покровов на абразионных поверхностях. Накопление углематеринских масс тяготело к водораздельным пространствам. Аллювиальное осадконакопление в целом создавало общий план рельефа, который определял особенности седиментации. Основную часть времени бассейн седиментации представлял собой пологую волнистую аллювиальную равнину. Периодически здесь появлялось заливно-лагунное морское побережье, обычно сменяемое морским водоемом с островами и открытым морем. Главными факторами преобразования рельефа являлись аллювиальная седиментация, морская абразия, тектонические движения дна бассейна угленакопления и окружающих площадей.

Ключевые слова: палеорельеф, угленакопление, Восточный Донбасс, аллювиальная волнистая равнина, унаследованность палеорельефа.

Благодарности: Публикация подготовлена в рамках реализации Государственного задания ЮНЦ РАН, № ГР. проекта 122020100345-8.

Для цитирования: Мохов А. В. Реконструкция рельефа и обстановки седиментации в бассейне угле-накопления (на примере Восточного Донбасса). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 107-118. DOI: 10.46698/VNC. 2022.86.44.007.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

[DOI: 10.46698/VNC. 2022.86.44.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.86.44.007)

Original paper

Reconstruction of land relief and sedimentation conditions in the coal accumulation basin (at the example of Eastern Donbass)

A. V. Mokhov 

Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the Russian Academy
of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation,
e-mail: mochov@ssc-ras.ru; mokhov_av@mail.ru

Received: 08.06.2022, revised: 08.07.2022, accepted: 19.07.2022

Abstract: The article is devoted to revealing the morphology, origin, transformation of the paleorelief of the territory of the Middle Carboniferous coal accumulation in the western part of the Eastern Donbass. **The relevance of the work** is determined by the need to develop the scientific foundations of coal accumulation to determine the industrial value and mineragenic prospects of the territories. **Aim.** Improvement of the theory of coal accumulation and primary structure formation in sedimentary formations in general. **Methods.** Material-structural analysis and comparison of intersecting geological sections of the coal-bearing territory of the western part of the Eastern Donbass using known lithological-structural methods, comparison of geological sections. **Results.** The relief reconstruction was based on the analysis and comparison of intersecting palinspastic geological sections of the coal-bearing suite C_2^5 of the Bashkirian stage of the middle section of the Carboniferous system in the western part of the Eastern Donbas. The rock massif was investigated in the interval of the section between the layers of limestones K_3 and K_6^3 with a thickness of about 450-500 m. The suite is composed mainly of clastic and clayey deposits of the paleo-river delta interbedded with bodies of marine limestones of biogenic-chemogenic origin. Paleosoil horizons are common at the base of coal bodies. Gentle convex and concave cup-shaped bends of the layers are developed, elongated in the submeridional direction. In the cores of concave folds, lenses of sandstones and limestones are common. The cores of convex bends are composed of contractive channel alluvium. Bends are non-tectonic folds of cladding and replicate the terrain. Their existence is a sign of the formation of a direct paleorelief of the coal accumulation basin. The morphology and dimensions of the bends of the layers have the same characteristics as the copied terrain elements. The uplands and hollows of the paleorelief have a submeridional strike. The largest paleomounds along the route of the sublatitudinal section had a width of up to 15 km and a relative height of about 50 m. The width of the hollows is comparable, their depth is usually up to 25m. The slope of the surface is usually up to 0.45°. The repetition of the bends of the paleosurface at several stratigraphic levels indicates the translation of the outlines of the largest elements of the relief and the hydro-network in time. Limestones accumulated in hollows during ingressions, and during large transgressions of the sea – in the form of areal covers on abrasion surfaces. The accumulation of coal source masses gravitated

towards the watershed spaces. Alluvial sedimentation as a whole created a general relief plan, which determined the features of sedimentation. Most of the time, the sedimentation basin was a gently undulating alluvial plain. From time to time, a bay-lagoon sea coast appeared here, usually replaced by a sea reservoir with islands and the open sea. The main factors of relief transformation were alluvial sedimentation, marine abrasion, tectonic movements of the bottom of the coal accumulation basin and surrounding areas.

Keywords: paleorelief, coal accumulation, Eastern Donbass, waved alluvial plain, inheritance of paleorelief.

Acknowledgements: *The work was carried out as part of the implementation of the state task of the UNC RAS, state registration number of the project 122020100345-8.*

For citation: Mokhov A. V. Reconstruction of land relief and sedimentation conditions in the coal accumulation basin (at the example of Eastern Donbass). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 107-118. DOI: 10.46698/VNC. 2022.86.44.007.

Введение

Реконструкция обстановки и рельефа бассейна седиментации входит в состав задач разведки важнейших осадочных полезных ископаемых. Этому вопросу посвящены многочисленные публикации применительно к нефтегазовым, эвапоритовым, угленосным и другим объектам, например [Reading, 1996; Retallack, 2001; Алексеев, 2006]. Однако, многие базовые научные положения и выводы остаются спорными и являются предметом активного обсуждения и исследования. Решение задачи предполагает выявление реликтов и косвенных признаков палеорельефа, использование их вероятной связи с геологическим строением объектов, например [Алексеев, 2006; Davydenko, 2008; Mokhov, 2019].

Настоящая публикация посвящена выявлению рельефа бассейнов угленакопления, особенностей седиментации, их взаимосвязей и трансформации в условиях Восточного Донбасса на основе вещественно-структурного исследования геологических разрезов угленосного массива западной части региона с учетом новых данных об обстановках угленакопления [Shulga et al., 2005; Mokhov, 2019; Мохов, 2021].

Согласно представлениям ведущих исследователей угольные залежи каменно-угольного возраста образовались здесь и в Донбассе в целом на месте торфяных болот. Залежи формировались в прибрежно-морских – паралических ([Иванов, 1967; Егоров, 1992; Троценко, 2000, 2014; Troshchenko, 2012, 2013 и др.]) либо дельтовых условиях ([Наливкин, 1956; Ягубянец, 1988 и др.]). Наличие слоев морских известняков регионального распространения указывает на чередование здесь континентальной и морской обстановок. Территория региона представляла собой заболоченную равнину, периодически подвергающуюся обширной трансгрессии мелководного нормально соленого моря. Следы дельты прослеживаются здесь в виде полос русловых и площадей пойменных отложений.

Материалы и методы исследования

Использованы материалы разведочных работ на уголь из производственных отчетов ПГО «Южгеология» в виде палинспастических разрезов Восточного Донбасса. Применены стандартный комплекс методов вещественно-структурного анализа угленосного массива, а также использованы рекомендации [Фролов, 1993; Davydenko, 2008; Методы..., 2010; Шарданова и др., 2017; 2019; Давыденко и др., 2021].

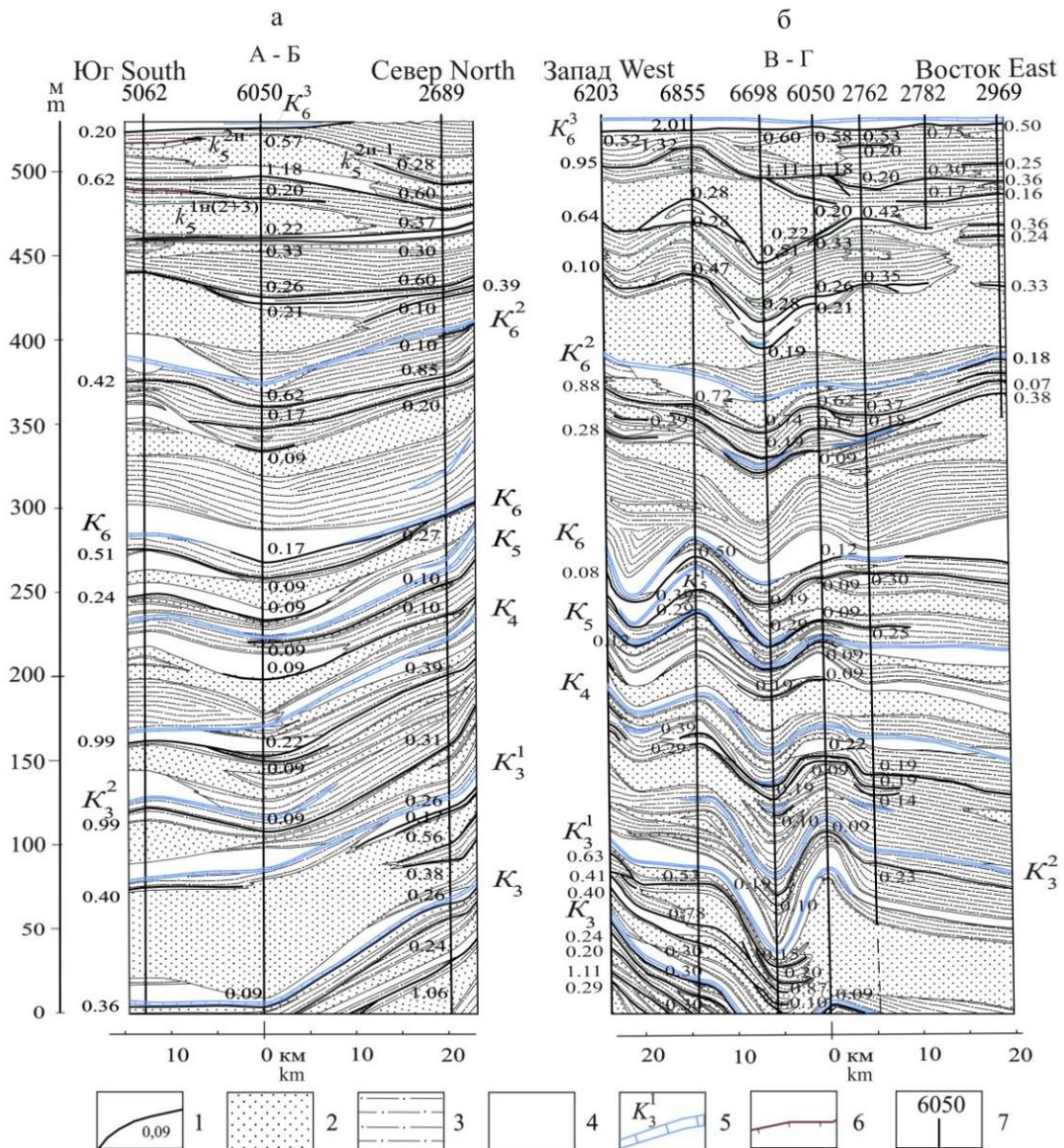


Рис. 1. Геологические разрезы свиты C_2^5 по субмеридиональному (а) и субширотному (б) профилям (по материалам К. В. Носовой и др., 1983 г. с изменениями автора)

1 – угольная залежь и мощность угольных пачек; 2 – песчаники; 3 – алевриты; 4 – аргиллиты; 5 – известняк и его геологический индекс; 6 – палеопочва («кучерявчик»); 7 – буровая скважина, ее номер /

Fig. 1. Geological sections of the C_2^5 suite along the submeridional (a) and sublatitudinal (b) profiles (based on the materials of K. V. Nosova et al., 1983 with changes by the author)

1 – coal deposit and thickness of coal packs; 2 – sandstones; 3 – siltstones; 4 – mudstones; 5 – limestone and its geological index; 6 – paleosoil (“kucheryavchik”); 7 – borehole, its number

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование вертикальных субмеридионального (рис. 1а) и субширотного (рис. 1б) разрезов одного из интервалов каменской свиты C_2^5 башкирского яруса среднего отдела каменноугольной системы позволяет выявить крупные элементы рельефа местности, изменчивость и ряд агентов его трансформации. Разрезы под-

готовлены на основе неопубликованных материалов К.Б. Носовой и др. (1983 г.). Субширотный разрез проходит вблизи и вдоль оси Донецкого синклинория. Тектоническая нарушенность частично «снята» путем палинспастической реконструкции. За неподвижный элемент принят слой известняка K_6^3 . Расположение разрезов показано на рисунке 2.

Толща свиты сложена чередованием слоев песчаников, аргиллитов, алевролитов, известняков и гумусовых углей, часто выдержанных на большой площади. Известняки однотипны: обычно глинисты, содержат обильную мелководную морскую фауну (брахиоподы, криноидеи, одиночные кораллы и проч.), имеют биогенно-хемогенное происхождение. Тела других пород часто имеют признаки континентального генезиса. В почве угольных пластов регулярно присутствуют «кучерявчики» – горизонты палеопочв.

Мощность свиты возрастает к югу и востоку от участка исследований. К северу – территории вероятного размещения крупных морских водоемов – происходит общее возрастание доли известняков в составе свиты. Основным источником терригенного материала располагался к югу от региона [Геология СССР..., 1969].

Находящаяся на пересечении разрезов скважина 6050 вскрывает серию выпуклых широких протяженных изгибов слоев различного состава между известняками K_3 и K_6^3 в интервале мощностью около 450-500 м. С обеих сторон к этим структурам примыкают на субширотном разрезе глубокие чашевидные изгибы слоев. Для них характерна повышенная мощность глинистых тел, распространение линз песчаника и известняка.

Под нижним выпуклым изгибом – его верх условно проведен по реперному известняку K_3^1 – вскрыт раздвиг толщи косослоистых песчаников (рис. 1б). Особенностью песчаного массива в субширотном разрезе являются его трапецевидность с суженным верхом, убывание мощности по обе стороны от скважины к западу и

востоку. Массив составляет ядро выпуклой складки, четко выраженной в этом сечении. Подошва толщи песчаников в основании упомянутой структуры от-

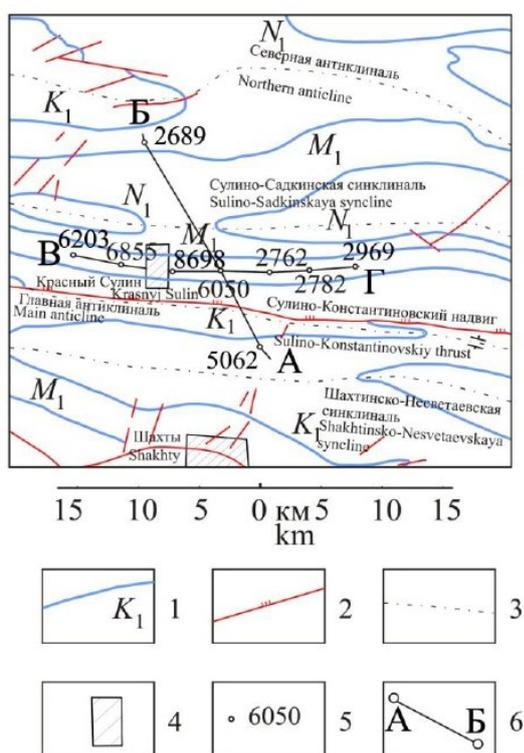


Рис. 2. Геологическая карта каменноугольных отложений в западной части Восточного Донбасса (Геологическая основа ПГО «Южгеология», 1990 г.).

1 – выход маркирующего слоя известняка на земную поверхность и его геологический индекс; 2 – крупное разрывное нарушение; 3 – ось крупной складки; 4 – населенный пункт; 5 – углеразведочная скважина и ее номер; 6 – линия геологического разреза /

Fig. 2. Geological map of carboniferous deposits in the western part of the Eastern Donbas (Geological basis of the PGO “Yuzhgeologia”, 1990).

1 – outcrop of the marking limestone layer on the earth’s surface and its geological index; 2 – large disjunctive fault; 3 – axis of a large fold; 4 – settlement; 5 – coal exploration well and its number; 6 – line of the geological section

носителем уплощена, что отражает отсутствие у складки глубоких «корней», ее невовлеченность в тектоническую деформацию местного масштаба. Основание раздува имеет эрозионный врез глубиной около 10 м в глинистый субстрат.

Изгибы выпадают из структурного плана синклиория посткаменноугольного возраста. Их зачатки появились на этапе общего погружения территории и имеют нетектоническое происхождение.

Морфология толщи песчаника в ядре нижнего изгиба указывает на ее аллювиальный генезис. Она свидетельствует о постепенном возвышении долины палеореки (рукава дельты) над окружающей местностью на отлагаемом аллювии, формировании крупного подруслового положительного элемента рельефа региональной протяженности. Выпуклый изгиб возник на раздуве-возвышенности руслового происхождения. Изгибы-впадины развиты в пойменной части долины. Русловые и пойменные отложения принадлежат соответственно к типу констративного аллювия. Его появление отражает крупное опускание земной поверхности с накоплением мощной компенсирующей (по [Ламакин, 1950]) или сверхкомпенсирующей прогибание толщи осадков.

Изгибы слоев могут быть отождествлены со структурами осадочного облекания, копирующими поверхность субстрата в ходе седиментации и формирующимися на крупных положительных или отрицательных элементах рельефа. Аналогичные складки близкого размера и того же генезиса развиты к западу от скважины 6050 на протяжении более чем 30 км и в меньшей степени к востоку.

В отличие от субширотного, на субмеридиональном разрезе изгибы выражены значительно слабее, поскольку протягиваются в том же направлении. Толща песчаников имеет здесь повышенную и вполне выдержанную мощность на большом плече. Длина облекающих изгибов составляет десятки километров.

Наличие изгибов слоев отражает основные особенности рельефа местности.

На них указывает также залегание в изгибах-впадинах на континентальных фазах линз мелководных морских известняков: выше слоя известняка K_3^2 , ниже слоя известняка K_4 , ниже и выше слоя известняка K_6^2 (рис. 1б). Короткие на субширотном разрезе, тела известняков простираются на десятки километров в субмеридиональном направлении. Отсутствие следов денудации позволяет сделать вывод о первичности подобной морфологии и границ тел, тяготении участков отложения будущих линзовидных тел карбонатов (и песчаников) к понижениям рельефа. Наличие таких тел служит индикатором существования вытянутых и открывающихся к морю впадин поверхности – путей вторжения морских вод и локализации будущих заливов моря.

Аллювиальное осадконакопление в целом создает общий план рельефа, который в дальнейшем определял ход и особенности седиментации.

Наличие выпуклости слоев (известняка K_3^1 и других литотипов) над положительными, вогнутости – над отрицательными элементами субстрата указывают на возникновение прямого рельефа текущей поверхности бассейна седиментации. Видна корреляция современных формы и параметров изгибов реперного слоя K_3^1 с характеристиками копируемого рельефа. Имеются достаточные основания заключить о существовании на месте изгибов слоя K_3^1 по обе стороны от оси скважины 6050 меридионально вытянутых возвышенностей и ложбин на стадии седиментации. Вероятно также присутствие прирусловых валов того же простираения у рукавов дельты.

Вогнутые изгибы слоя K_3^1 подстилаются толщей с повышенным содержанием глинистых пород. Под выпуклыми изгибами, напротив, преобладают песчаники. Разная уплотняемость основания, более высокая на участках повышенного содержанием глинистых осадков, служит дополнительной причиной возникновения неровностей рельефа.

Изгибы слоев реперных известняков K_3^2 , K_4 , K_5 , K_5^1 , K_6 , K_6^2 и других литотипов в остальных частях интервала имеют аналогичное происхождение и сходное расположение относительно оси скважины 6050 (рис. 1б).

Их повторение на нескольких стратиграфических уровнях свидетельствует о трансляции во времени (на разрезах – по нормали к первичному напластованию) очертаний рельефа в виде солитона. В определенные моменты времени местность имела существенно волнистую поверхность. Положительные элементы рельефа слагались преимущественно русловым аллювием и чередовались со сточными ложбинами, по-видимому, местами заболоченными. Контрастность рельефа ослабевала к востоку.

Размещение возвышенностей и ложбин рельефа, крупных речных рукавов в субширотном разрезе на этапе накопления интервала массива между известняками K_3 и K_6^3 иллюстрирует рисунок 1. Непосредственный субстрат слагался слаболитифицированными породами (консолированными массами песков, алевроитов, глинистых илов).

Первоначально субширотное течение рукава, формировавшего толщу песчаника под нижним изгибом (реперного слоя известняка K_3^1), постепенно отклонилось к северу. Течение других крупных рукавов приобрело ту же направленность.

Измерениями на разрезе выявлены параметры пересекаемого скважиной 6050 выпуклого изгиба слоя известняка K_3^1 и, соответственно, копируемого им рельефа в субширотном сечении.

К западу от скважины параметры изгиба и палеовозвышенности составляют: относительная высота около 50 м, уклон поверхности борта – 0,0078 (0,45°). Ширина прилегающего изгиба-впадины – около 14 км. Параметры восточного склона возвышенности составляют: высота около 25 м; уклон поверхности – 0,004 (0,25°). Максимальная глубина морского залива на этом участке ингрессии оценивается величиной около 45 м (рис. 3).

Снизу вверх в интервале K_3^1 - K_6^3 высота вскрытых скважиной 6050 выпуклых складок-изгибов убывает на западе и востоке в несколько раз.

Одной из причин ослабления контрастности рельефа при трансляции служит заполнение бассейна седиментации илами. Материнский материал вытянутых тел известняков накапливался в ложбинах, а при крупных трансгрессиях моря – в виде площадных покровов на абразионной неровной поверхности субстрата.

Периодические трансгрессии моря способствовали как заполнению бассейна осадками, так и абразии возвышенностей с общей тенденцией выравнивания местности. Наиболее отчетливо их следы выражены в субширотном разрезе. Крупные абразионные поверхности, проявляющиеся только на субмеридиальном разрезе, находятся в подошве известняков K_4 , K_6^2 и на одном уровне с известняком K_6^3 . Однако, как показывает распределение тел этих литотипов в разрезе и на площади, а также морфология изгибов слоев на разрезах, нивелировка поверхности не была полной, и имело место сохранение реликтов элементов рельефа. Максимальное значение приобретали фронтальные трансгрессии, обеспечившие появление

сплошных тонких покровов карбонатов – будущих слоев известняков K_3^1 , K_4 , K_5 , K_6^2 . На короткие промежутки времени при небольших трансгрессиях береговая линия моря, условно совпадающая с контуром выклинивания известняков K_3^1 и K_6 , достигала района скважины 6050.

На субмеридиональном профиле отчетливые следы ингрессии появляются только к моменту накопления в пологой крупной ложбине линзы известняка K_6^3 , имеющего на другом профиле региональное распространение. Отметим связь слабого проявления этой ложбины с нивелирующим влиянием палинспастических построений к верхам разрезов.

Обширные трансгрессии вызывали прекращение аллювиальной деятельности и погребение дельты. Отступления моря сопровождались восстановлением старых и в меньшей степени появлением новых русел водотоков. Довольно мощные аллювиальные отложения имеются под известняком K_4 , несколько ниже известняка K_6 и выше известняка K_6^2 . Над известняком K_6^2 заметны (рис. 1б) следы двух крупных

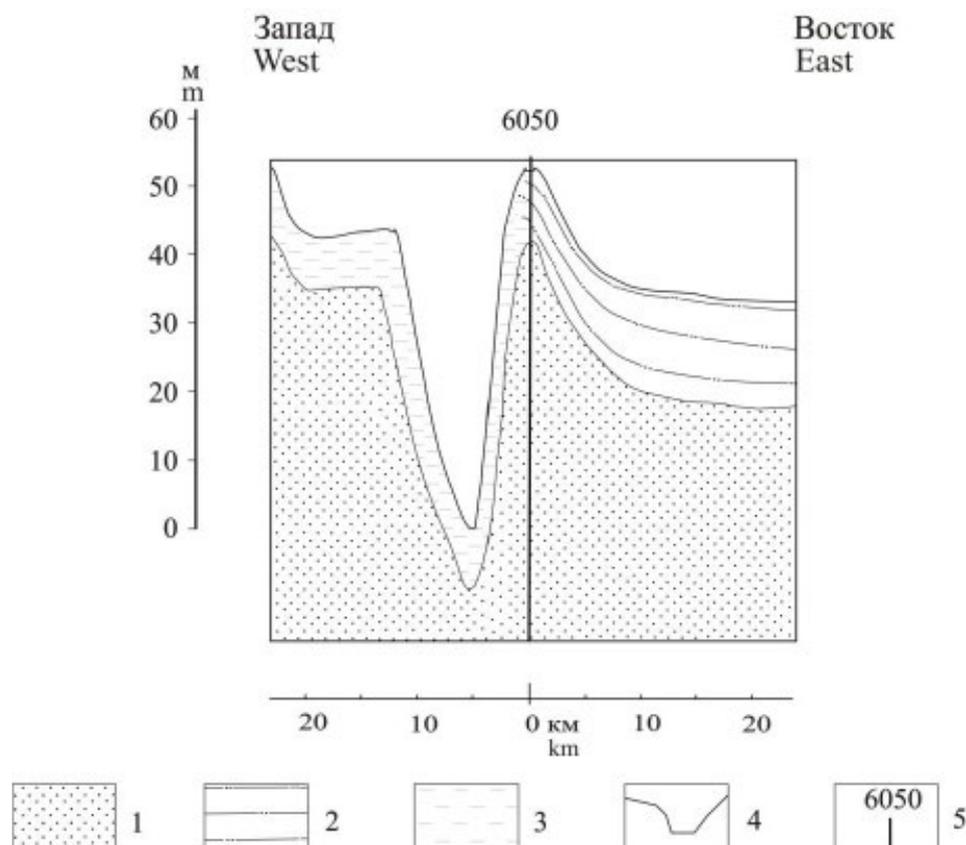


Рис. 3. Рельеф земной палеоповерхности на субширотном профиле (фрагмент рис. 1б) к моменту накопления известняка K_3^1 (реконструкция) в окрестностях скважины № 6050 (по материалам К. Б. Носовой и др., 1983 г.)

1 – пески консолидированные; 2 – алевриты консолидированные; 3 – глинистые илы консолидированные; 4 – палеорусло; 5 – буровая скважина и ее номер /
Fig. 3. The relief of the earth's paleosurface on the sublatitudinal profile (fragment of Fig. 1b) at the time of accumulation of limestone K_3^1 (reconstruction) in the vicinity of well No. 6050 (based on materials by K. B. Nosova et al., 1983)

1 – consolidated sands; 2 – consolidated silts; 3 – consolidated clay oozes;
4 – paleochannel; 5 – borehole and its number

рукавов в виде раздувов толщи песчаников. В промежутке между известняками K_3^1 и K_5 в понижениях рельефа присутствуют линзы песчаника и алевролита – реликты деятельности более мелких каналов дельты. Такие следы в виде размывов и сингенетичных размывоподобных структур широко распространены в пределах горных отводов угольных шахт региона.

На сумеридиональном разрезе отчетливо фиксируются следы быстрого развития и превращения одного из малых рукавов дельты в более крупный (затем – отмерший) с отложением мощного массива-раздува аллювиального песчаника под слоем известняка K_6^3 у скважины 6050. Особенности морфологии тела указывают на его констративность – ведущий фактор формирования рельефа и фациальной обстановки местности.

Для участка характерны выдержанность угольных залежей в субмеридиональном и повышенная изменчивость в субширотном разрезе.

Более мощные части залежей обычно приурочены к водоразделам. Латеральное соседство на вершине изгиба угольного тела с известняком K_6 во впадинах у скважины 6050, а также с линзой известняков в 30 м ниже известняка K_6^2 между скважинами 6050 и 2762 (рис. 1б) указывает на смежность участков континентальной и морской седиментации, соответственно, на возвышенности и у ее подножья. Появление к западу от скважины 6050 вдоль оси скважины 5062 линз «кучерявчиков», затем переходящих латерально в угольные пласты $k_5^{1н(2+3)}$ и $k_5^{2н}$ (рис. 1а), обусловлено по нашему мнению еще на стадии зарождения угольного тела быстрым локальным подавлением угленакопления минеральным материалом. Эти «кучерявчики» формировались в ложбинах, возникающих на более глинистом по составу субстрате-основании. Главный источник этого материала – русло одного из рукавов дельты – отчетливо виден на примере пласта $k_5^{2н}$, переходящего в один из «кучерявчиков» в сторону аллювиального руслового раздува песчаника у скважины 6050 (рис. 1а). Тот же источник ответственен за отсутствие несколько более молодого пласта $k_5^{2н-1}$ на большой площади к северу от данной скважины и формирующегося руслом раздува. Этот случай интересен тем, что угленакопление зародилось и продолжительное время развивалось в пойме одного из малых рукавов до момента резкого возрастания расхода воды в нем.

Таким образом, тяготение угленакопления в целом к водоразделам связано с сохранением здесь максимально долго благоприятных для него условий.

Неровности местности обеспечивали возникновение островного рельефа, локальность накопления карбонатных илов и углематеринской массы на ранних и средних этапах трансгрессии морского водоема. Крупнейшие трансгрессии приводили к исчезновению островов, в частности, под влиянием абразии.

Общее нарастание доли морских известняков в бассейне к северу, распространение их линз в понижениях палеорельефа, субмеридиональность простирания указывают на наступление моря с севера и северо-востока (на стадии накопления известняков K_3^2 , K_6 , – по-видимому, также северо-запада). Ту же направленность главных трансгрессий отражает преимущественное простирание и вытянутость абразионных поверхностей, заход их на исследуемый участок с севера, как это видно, например, на рис. 1а у скважины 2689 на уровне известняка K_6^3 . Эти данные служат аргументом в пользу известных [Геология СССР..., 1969], хотя и имеющих альтернативы, представлений о размещении морских водоемов в целом далеко к северу от рассматриваемого региона. Трансгрессии и регрессии, аллювиальная де-

тельность отражали ход вертикальных тектонических движений дна бассейна и поверхности питающих седиментацию терригенным материалом континентальных областей.

Доставка растительно-минеральных взвесей к участку производилась речной сетью в основном с юга. Разливами текущих в субмеридиональном направлении рукавов они распространялись затем на прилегающую частично заболоченную местность к западу и востоку, создавая, развивая или разубоживая скопления растительного материала часто на «кучерявчиках». К концу образования исследуемого интервала разреза массива происходит поворот одного из рукавов у точки скважины 6050 (рис. 1а) в субширотном направлении, по-видимому, ввиду появления локального уклона погружающейся поверхности к западу. Данное событие предшествует моменту накопления в пологой крупной ложбине линзы карбонатных илов – материала будущего тела известняка K_6^3 .

Наклон реперных слоев известняков на субмеридиональном разрезе к югу указывает на общий уклон поверхности дна бассейна седиментации в том же направлении. Вариации наклона слоев на субширотном разрезе отражают неравномерность оседания дна во времени, преобладание приращения его наклона на восток на отрезке времени формирования нижней части рассматриваемого интервала.

Выводы

Вещественно-структурные особенности массива отражают периодическое преобразование бассейна угленакопления. Оно определило унаследованность рисунка крупнейших неровностей рельефа и гидросети на время накопления пород большей части интервала $K_3 - K_6^3$ разреза. На протяжении основной части времени местность представляла собой аллювиальную, довольно пологую волнистую равнину с преобладающим наклоном к северу, в другое время – к северо-востоку, иногда – к западу. Небольшую часть времени здесь существовало заливно-лагунное морское побережье, впоследствии – обычно морской водоем с островами и открытым морем. Эти обстановки периодически сменяли друг друга. Главными факторами преобразования ландшафта и угленакопления являлись аллювиальная деятельность, трансгрессии моря и тектонические преимущественно нисходящие движения дна бассейна седиментации и разнонаправленные движения окружающих площадей.

Сделанные выводы имеют значение для территорий с аналогичным механизмом накопления угленосных и других осадочных толщ.

Литература

1. Алексеев В.П. Литологические этюды. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ. – 2006. – 149 с.
2. Геология СССР. Том XLVI. Ростовская, Волгоградская, Астраханская области и Калмыцкая АССР. Геологическое описание. Коллектив авторов. – М.: Недра. – 1969. – 666 с.
3. Давыденко Д.Б., Парада С.Г. Опыт разделения потенциальных полей Донбасса на фоновую, остаточную и локальную составляющие и некоторые результаты интерпретации. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 22-37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003.
4. Егоров А.И. Глобальная эволюция торфонакопления. Палеозой. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та. – 1992. – 320 с.
5. Иванов Г.А. Угленосные формации (закономерности строения, образования, изменения и генетическая классификация). – Л.: Наука, 1967. – 407 с.

6. Ламакин В. В. О динамической классификации речных отложений. // Землеведение. Новая серия. Т. 3 (43). – М.: Моск. общ. испыт. природы, 1950. – С. 161-168.
7. Методы палеогеографических реконструкций: Методическое Пособие / Коллектив авторов: Блюм Н. С., Болиховская Н. С., Большаков В. А., Глушанкова Н. И. и др. – М.: МГУ. – 2010-430 с.
8. Мохов А. В. О происхождении и морфологии z – образных расщеплений угольных залежей (на примере Восточного Донбасса). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 121-134. DOI:10.46698/VNC. 2021.31.82.010.
9. Наливкин Д. В. Учение о фациях. Т. 1. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 534 с.
10. Трощенко В. В. Модель аллохтонного угленакопления как основная для параличских угольных бассейнов. // Вестник ЮНЦ РАН. – 2000. – Т. 2. №3. – С. 33-41.
11. Трощенко В. В. Генетические основы морфологии торфяников и угольных пластов. // Вестник ЮНЦ РАН. – 2014. – Т. 10. №3. – С. 61-68.
12. Фролов В. Т. Литология. Кн. 2: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 432 с.
13. Шарданова Т. А., Фадеев Н. П., Хомяк А. Н., Косоруков В. Л. Особенности строения и формирования высокоуглеродистых комплексов. // Отечественная геология. – 2017. – №3. – С. 74-84.
14. Шарданова Т. А., Хомяк А. Н., Хао Юэсян. Литолого-фациальный анализ высокоуглеродистых комплексов. // В сб. научных материалов: Экзолит-2019. Фациальный анализ в литологии: теория и практика, Москва, 27-28 мая 2019 г. – М.: МАКС Пресс, 2019. – С. 157-159.
15. Ягубянец Т. А. Морфоструктурный анализ угольных залежей. – М.: Недра. – 1988. – 126 с.
16. Davydenko D. B. Analytical Model of the Dynamics of Paleoshelf Morphostructures as an Element of Sedimentological Analysis of Petroleum-Promising Associations. // Doklady Earth Sciences. – 2008. – Vol. 422, Part 1. – pp. 1021-1024.
17. Mokhov A. V. Morphology and Genesis of Washout-Like Structures in a Coal Seam (Eastern Donbass). // Doklady Earth Sciences. – 2019. – Vol. 487, Part 1. – pp. 769-772. DOI:10.1134/S1028334X19070249.
18. Reading H. G. Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphi. – Oxford: Blackwell Science. – 1996. – 688 p.
19. Retallack G. I. Soils of the Pas An Introductions to Paleopedology. – Oxford: Blackwell Science. – 2001. – 404 p.
20. Shulga V., Matrofajlo N., Kostik J. et al. The Relation of splittings with tectonics in the coal seams of the Lvov-Volhynian coal Basin. // Mater. XXVIII Simposium “Geologia formacji weglonosnych Polski”. – Krakow. – 2005. – pp. 103-108.
21. Troshchenko V. V. Origin of coal – new look. Sedimentation stage. – LAP-Lambert Academic Publishing, Saarbruücken. – 2012. – 126 p.
22. Troshchenko V. V. The rhythmic build of sedimentary formations as a mirror of the washout areas paleotectonics. Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine. Donetsk, 2013. pp. 166-173.

References

1. Alekseev V. P. Lithological studies. Yekaterinburg, USGU. 2006. 149 p. (In Russ.)
2. Geology of the USSR. Volume XLVI. Rostov, Volgograd, Astrakhan regions and Kalmyk ASSR. Geological description. Moscow, Nedra. 1969. 666 p. (In Russ.)
3. Davydenko D. B., Parada S. G. Experience of dividing potential fields of Donbass into background, residual and local components and some results of interpretation. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 22-37. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC. 2021.23.67.003.
4. Egorov A. I. Global evolution of peat accumulation. Paleozoic, Rostov-on-Don, Rostov University. 1992. 320 p. (in Russ.)

5. Ivanov G.A. Coal-bearing formations (patterns of structure, formation, changes and genetic classification). Leningrad, Nauka. 1967. 407 p. (in Russ.)
6. Lamakin V.V. Dynamic Classification of Alluvial Deposits. Physical Geography. *Zemlevedenie*. Vol. 3. No. 43. Moscow. 1950. pp. 161-168. (in Russ.)
7. Blum N.S., Bolikhovskaya N.S., Bolshakov V.A., Glushankova N.I. et al. Methods of paleogeographic reconstructions: Methodological Manual. Moscow. MSU. 2010430 p. (in Russ.)
8. Mokhov A.V. On the origin and morphology of Z-shaped splitting of coal deposits (on the example of Eastern Donbass). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 121-134. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC. 2021.31.82.010.
9. Nalivkin D.V. The study of facies. Vol. 1. Moscow-Leningrad. the USSR Academy of Sciences. 1956. 534 p. (in Russ.)
10. Troshchenko V.V. Model of allochthonous coal accumulation process as the basis for paralic coal basins. *Bulletin of the SSC RAS*. 2000. Vol. 2. No. 3. pp. 33-41. (in Russ.)
11. Troshchenko V.V. Genetic aspects of morphology of peat and coal deposits. *Bulletin of the SSC RAS*. 2014. Vol. 10. No. 3. pp. 61-68. (in Russ.)
12. Frolov V.T. Lithology. Book 2. Work-Book. Moscow. MSU. 1993. 432 p. (in Russ.)
13. Shardanova T.A., Fadeev N.P., Khomyak A.N., Kosorukov V.L. Features of the structure and formation of high-carbon complexes. *Indigenous Geology*. 2017. No. 3. pp. 74-84. (in Russ.)
14. Shardanova T.A., Khomyak A.N., Hao Yuexian. Lithological-facies analysis of high-carbon complexes. In: *Proceedings of Exolit-2019. Facies analysis in lithology, theory and practice*. Moscow. MAKS Press. 2019. pp. 157-159. (in Russ.)
15. Yagubyants T.A. Morphostructural analysis of coal deposits. Moscow. Nedra. 1988. 126 p. (in Russ.)
16. Davydenko D.B. Analytical Model of the Dynamics of Paleoshelf Morphostructures as an Element of Sedimentological Analysis of Petroleum-Promising Associations. *Doklady Earth Sciences*. 2008. Vol. 422. Part 1. pp. 1021-1024.
17. Mokhov A.V. Morphology and Genesis of Washout-Like Structures in a Coal Seam (Eastern Donbass). *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 487. Part 1. pp. 769-772. DOI:10.1134/S1028334X19070249.
18. Reading H.G. *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphi*. Oxford, Blackwell Science. 1996. 688 p.
19. Retallack G.I. *Soils of the Pas An Introductions to Paleopedology*. Oxford, Blackwell Science. 2001. 404 p.
20. Shulga V., Matrofajlo N., Kostik J. et al. The Relation of splittings with tectonics in the coal seams of the Lvov-Volhynian coal Basin. *Mater. XXVIII Symposium Geologia formacj I weglonosnych Polski*. Krakow. 2005. pp. 103-108.
21. Troshchenko V.V. Origin of coal – new look. Sedimentation stage. LAP-Lambert Academic Publishing, Saarbruücken. 2012. 126 p.
22. Troshchenko V.V. The rhythmic build of sedimentary formations as a mirror of the washout areas paleotectonics. *Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine*. Donetsk, 2013. pp. 166-173.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК: 550.4.08

DOI: [10.46698/VNC.2022.23.74.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.23.74.008)

Оригинальная статья

Проблемы аналитического определения
благородных металлов в черносланцевых
породах Юга РоссииС. Г. Парада ^{1,2}, К. Ю. Гамбург ¹

¹Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр Российской академии наук», Россия, 344005, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: maurmar@yandex.ru;

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

Статья поступила: 04.07.2022, доработана: 09.08.2022, одобрена в печать: 16.08.2022

Резюме. Актуальность работы. В последние годы во многих публикациях обращается внимание на перспективы обнаружение благороднометалльного оруденения в черносланцевых толщах Северного Кавказа. В качестве обоснования приводятся результаты единичных определений Au, Pt и Pd, выполненных методами атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) или масс-спектрометрии в индуктивно связанной плазме (МС ИСП). При этом возможности примененных методов и полученных результатов авторами не подвергались анализу. В настоящей статье приведена попытка восполнить этот пробел. **Цель работы.** Оценить возможности аналитических методов ААС и МС ИСП для определения содержаний Au, Pt и Pd в черносланцевых толщах. **Методы работы.** Использованы результаты определения содержаний Au, Pt и Pd в черносланцевых толщах Северного Кавказа, приведенные в опубликованных работах. Проведен их анализ в аспекте адекватности примененных методов поставленным задачам и выводам. Основной акцент сделан на оценку надежности различных модификаций ААС и МС ИСП правильно определять содержания Au, Pt и Pd. **Результаты работы.** Поскольку методы ААС и МС ИСП не могут обеспечить обнаружение природных содержаний Au, Pt и Pd непосредственно из материала геологической пробы, возникает необходимость предварительного концентрирования этих элементов. С другой стороны, сложность состава геологических проб является причиной многочисленных влияний со стороны матричных компонентов на аналитические сигналы определяемых элементов, что также требует использования различных приемов избавления от такого влияния. Каждая из примененных дополнительных аналитических процедур может создавать свои погрешности и приводить к относительному изменению содержаний Au, Pt и Pd. Показано, что и на инструментальной стадии анализа методами ААС и МС ИСП возможно получение некорректного результата. На результат ААС может оказать влияние наложение спектральных линий матричных элементов на аналитические линии определяемых Au, Pt и Pd. В случае МС ИСП искажение результата может возникнуть при спектральных полиатомных наложениях (интерференция масс). Делается вывод, что оба охарактеризованных инструментальных метода действительно являются лучшими для определения Au, Pt и Pd в геологических объектах. Однако, при публикации результатов следует детально описывать и метрологически оценивать примененные модификации указанных методов, использованные аналитические линии и изотопные соотношения, а также все процедуры пробоподготовки и их характеристики.

Ключевые слова: золото, платина, палладий, атомно-абсорбционная спектроскопия, масс-спектрометрия в индуктивно связанной плазме, пробоподготовка, черные сланцы, Северный Кавказ.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках государственного задания на научно-исследовательские работы Южного научного центра РАН, № государственной регистрации 122020100345-8 и Геофизического института ВНЦ РАН.

Для цитирования: Парада С. Г., Гамбург К. Ю. Проблемы аналитического определения благородных металлов в черносланцевых породах Юга России. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 119-132. DOI: 10.46698/VNC. 2022.23.74.008.

===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION =====
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

[DOI: 10.46698/VNC. 2022.23.74.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.23.74.008)

Original article

Problems of analytical determination of precious metals in black shale rocks of the South of Russia

S. G. Parada ^{1,2}, K. Y. Hamburg ¹

¹Federal Research Centre the Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: maurmar@yandex. ru;

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

Received: 04.07.2022, revised: 09.08.2022, accepted: 16.08.2022

Abstract: Relevance. In recent years, many publications have drawn attention to the prospects for the detection of noble-metal mineralization in the black shale strata of the North Caucasus. The results of single determinations of Au, Pt and Pd performed by atomic absorption spectroscopy (AAS) or mass spectrometry in inductively coupled plasma (MS ICP) are presented as justification. At the same time, the possibilities of the methods used and the results obtained were not analyzed by the authors. This article attempts to fill this gap. Aim. To evaluate the capabilities of analytical methods of AAC and MS ICP for determining the contents of Au, Pt and Pd in black shale strata. Methods. The results of determination of Au, Pt and Pd contents in the black shale strata of the North Caucasus, given in the published works, are used. Their analysis is carried out in terms of the adequacy of the applied methods to the tasks and conclusions. The main emphasis is placed on assessing the reliability of various modifications of the AAC and MS ISP to correctly determine the contents of Au, Pt and Pd. Results. Since the AAC and MS ICP methods cannot provide detection of natural Au, Pt and Pd contents directly from the geological sample material, there is a need for preliminary concentration of these elements. On the other hand, the complexity of the composition of geological samples is the cause of numerous influences from matrix components on the analytical signals of the elements being determined, which also requires the use of various techniques to get rid of such influence. Each of the applied additional analytical procedures can create its own errors and lead to a relative change in the contents of Au, Pt and Pd. It is shown that it is possible to obtain an incorrect result at the instrumental stage of analysis by AAC and MS ICP methods. The AAC result may be influenced by the superposition of spectral lines of matrix elements on the analytical lines of the Au, Pt and Pd defined. In the case of MS ICP, distortion of the result may occur with spectral polyatomic overlays (mass interference). It is concluded that both characterized instrumental methods are indeed the best for determining Au, Pt and Pd in geological objects. However, when publishing the results, it is necessary to describe in detail and metrologically evaluate the applied modifications of these methods, the analytical lines and isotope ratios used, as well as all sample preparation procedures and their characteristics.

Keywords: gold, platinum, palladium, atomic absorption spectroscopy, mass spectrometry in inductively coupled plasma, sample preparation, black shales, North Caucasus.

Acknowledgements: The article was prepared within the framework of the state assignment for research work of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, state registration no. 122020100345-8 and the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre RAS.

For citation: Parada S. G., Hamburg K. Yu. Problems of Analytical Determination of Precious metals in Black shale rocks of Southern Russia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 119-132. DOI: 10.46698/VNC. 2022.23.74.008.

Введение

В последние годы все чаще появляются публикации о новом для Юга России типе руд благородных металлов, связанном с черносланцевыми толщами [Богуш и др., 2016, 2017, 2019, 2020; Гурбанов и др., 2019, 2020, 2021; Гончаров и др., 2007; Давыденко, Парада, 2019; Курбанов и др., 2011; Парада, 2017; Черкашин и др., 2021; и др.]. В трех из перечисленных работ рассматриваются месторождения и рудопроявления золота в таких толщах с учтенными Государственным балансом запасами и ресурсами. В них обосновывается полигенная природа руд благородных металлов, включающая, в том числе предположения об образовании ранних золотоносных минерализаций на различных стадиях литогенеза [Курбанов и др., 2011; Давыденко, Парада, 2019; Парада, 2017]. В остальных работах рассматриваются сами черносланцевые толщи предположительно как новый тип руд благородных металлов и как источник рудных элементов в эпигенетических гидротермальных рудах.

Материал и методы исследования

В качестве материала для данного исследования использованы результаты определения содержаний благородных металлов (БМ) в черносланцевых толщах, приведенные в немногочисленных публикациях. Эти результаты проанализированы в аспекте адекватности примененных методов анализа БМ поставленным задачам и выводам, а также достоверности полученных содержаний БМ в геологических объектах.

Основной акцент сделан на возможностях технологий примененных инструментальных методов ААС и МС ИСП для определения содержаний БМ в черносланцевых толщах. Обращено внимание на особенности пробоподготовки, включающей различные способы разложения пробы и концентрирования, так как прямое определение БМ указанными методами невозможно по причине их крайне низких содержаний в геологических объектах. Также обращено внимание на необходимость включения процедур избавления от мешающих матричных элементов. В качестве источником информации по указанным вопросам использованы публикации по аналитической химии БМ.

Результаты работы и их обсуждение

Впервые о возможной золотоносности черносланцевых толщ на территории Северного Кавказа сказано в работе [Гончаров и др., 2007]. В ней приводятся результаты оценки золотоносности артыкчатской (черносланцевой) толщи устья ручья Голубого (Худесский район) по результатам анализа четырех проб, отобранных в полосе неизменных филлитов. Спектрозолотометрический анализ этих проб показал содержания золота от 0,5 до 60 мг на тонну. Результаты частных анализов в статье не приводятся. Далее, в этой статье авторы пишут о результатах анализа

четырёх проб, отобранных ими из минерализованной зоны балки Грушовая. Содержания Au в этих пробах составили 0,11-0,16 г/т, Pt – 0,03-0,07 г/т, Pd – 0,3-0,5 г/т. В статье не указан примененный метод анализа.

В работе [Богуш и др., 2016] выполнен анализ на золото, платину и палладий двух групп проб, отобранных из черносланцевого комплекса Уруп-Лабинского района. Указывается, что анализы были выполнены в лаборатории физико-химических исследований Института геологии Дагестанского научного центра РАН атомно-абсорбционным методом. Какой именно вариант использовался (пламенный или термический) не упоминается (а это принципиальный вопрос для оценки результатов определения золота и др. благородных металлов). Первая группа проб отобрана, судя по приведенной схеме, по простиранию минерализованной зоны тектонического контакта дайки лейкократового гранита и черных сланцев бахмуткинской свиты с разнообразной сульфидной минерализацией в балке Грушовая. Из приведенных описаний становится ясно, что это эпигенетическая минерализация. По результатам анализа 27 проб содержания Au, Pt и Pd составили от сотых до десятых долей г/т. При этом средние содержания для каждого элемента оказались практически одинаковыми, – от 0,3 до 0,34 г/т. Следует согласиться с авторами, что в сумме эти металлы представлены субпромышленными концентрациями. Однако достоверность определения содержаний вызывает сомнение.

Вторая группа из 11-ти проб взята из обнажений черных сланцев бахмуткинской свиты балки Бахмутка Урупского района. Здесь результаты анализов примерно такие же, – для Au это десятые доли г/т, для Pt и Pd – от сотых до десятых долей г/т. Факт близости результатов анализов проб из зоны с эпигенетической сульфидной минерализацией с результатами анализов проб из черных сланцев без признаков наложенной минерализации, заставляет задуматься о соответствии поставленной задаче примененного метода анализа. Тем не менее, авторы предлагают рассматривать девонские углеродсодержащие толщи в качестве нового перспективного источника промышленных рудных объектов.

В последующих своих публикациях авторы развивали и дополняли свою идею на основе охарактеризованных выше анализов по балкам Грушевой и Бахмутке. Других анализов они не приводят.

В статье [Богуш и др., 2020] приведены результаты анализа 21 проб девонских черных сланцев, являющихся цокольным структурным этажом Чучкурского рудного поля. Выполнены они, как и в предыдущей статье, атомно-абсорбционным методом в лаборатории физико-химических исследований Института геологии Дагестанского научного центра РАН. Какой именно модификацией – в статье не уточняется. Содержания Au составили от 0,19 до 0,85 г/т, Pt – от 0,17 до 0,9 г/т, Pd – от 0,2 до 0,45 г/т. Однако в статье сами результаты анализов не приводятся.

Еще одна группа исследователей [Гурбанов и др., 2020] проанализировала 5 проб керна из нижних частей разреза промышленных отходов Фиагдонского хвостохранилища. Здесь складированы отходы переработки полиметаллических руд Какадур-Ханикомского (Как-Х) и Кадат-Хампаладагского (Кад-Х) месторождений, расположенных в полосе развития черных аргиллитов ниже-среднеюрского возраста. Авторами установлены следующие содержания благородных металлов в этих отходах: Au – от 0,05 до 0,35 г/т; Pd – от 0,042 до 0,049 г/т; Pt – от 0,07 до 1,29 г/т. Ими также проанализированы 4 пробы аргиллитов из разных частей разреза рудовмещающей толщи. В них установлены содержания Au – от 0,01 до 0,05 г/т;

Pd – от 0,003 до 0,01 г/т; Pt – от 0,002 до 0,01 г/т. На основании этих данных авторы считают, что выявили «новый для Северного Кавказа ранне-среднеюрский черносланцевый благороднометалльный с полиметаллами тип оруденения» [Гурбанов и др., 2020, с. 18].

В следующей своей статье [Гурбанов и др., 2021] авторы выдвигают гипотезу о формировании оруденения Авсандур-Ламардонского рудного поля за счет повышенной металлоносности вмещающих ниже-среднеюрских черных аргиллитов. Основанием, как они считают, являются в том числе и результаты анализов двух сводных проб, каждая из которых отобрана с площади 10 м², представленных рудовмещающими аргиллитами из отвалов штолен месторождений Кад-Х и Как-Х, а также результаты таким же способом отобранных сводных проб из 700-метрового (по вертикали) разреза юрской черносланцевой толщи. Анализы проведены методом МС ИСП в ЦКП «ИГЕМ-АНАЛИТИКА». Какая модификация применялась (изотопное разбавление или внешняя градуировка) не сказано, описание технологии подготовки проб не приводится. Авторы указывают, что в пробах из нижней и средней части разреза золото, платина и палладий не обнаружены, в то время как в пробах из верхней части разреза, непосредственно вмещающей рудные тела полиметаллического месторождения, содержание Au составило 0,06 г/т, Ru – 0,002 г/т; Pd – 0,05; Pt – 0,002 г/т. Авторы полагают, что эти данные могут свидетельствовать об эпигенетическом поступлении благородных металлов в углеродистые рудовмещающие породы.

Таким образом, авторами перечисленных выше статей, в соответствии с изложенными результатами, предполагается новый тип благороднометалльных руд на Северном Кавказе, тесно связанных с черносланцевыми толщами палеозоя и мезозоя. При этом достоверность полученных результатов, в частности возможности примененных методов анализа благородных металлов в черносланцевых толщах и оценка погрешностей методов авторами не подвергались какому-либо анализу.

В настоящей статье изложена попытка восполнить этот пробел.

Метод атомно-адсорбционной спектроскопии

Первой группой исследователей использован метод атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Метод ААС основан на способности свободных атомов поглощать световую энергию только в характерном для конкретного атома диапазоне (атомная абсорбция). В результате облучения атомного пара светом возникает сравнительно небольшое число линий поглощения. Их называют резонансными и используют в качестве аналитических. Каждому элементу соответствует свой набор спектральных линий, интенсивность которых измеряется при помощи специальных приборов. Для перевода вещества в атомный пар используются пламенный, электротермический и лазерный способы. Пламенный способ используется для определения содержания химических элементов в растворах, беспламенные способы (электротермический и лазерный) – для определения элементов в твердых образцах. В отличие от эмиссионной спектроскопии ААС обладает высокой селективностью, большей чувствительностью, хорошей воспроизводимостью и точностью. Основным недостатком метода ААС является узкий диапазон линейности и, соответственно, необходимость концентрирования или разбавления раствора перед измерением.

Однако этим недостатки ААС для определения Au и ЭПГ не ограничиваются. На правильность результата оказывают влияние матричные элементы пробы, спек-

Таблица 1 / Table 1

Характер влияния элементов матрицы пробы на результат определения Pt и Pd (по [Актуганова и др., 2004] с дополнениями авторов) / The nature of the influence of the elements of the sample matrix on the result of determining Pt and Pd (according to [Aktuganova et al., 2004] with additions by the authors)

Определяемый элемент (ОЭ) / Defined element (OE)	Длина волны ОЭ / OE wave-length	Мешающий элемент (МЭ) / Interfering element (ME)	Длина волны МЭ / ME wave-length	Разница длин волн ОЭ и МЭ / The difference in the wavelengths of OE and ME	Влияние МЭ на результат / The influence of ME on the result
Pt	265,945	Al	266,039	0,094	Не удается выделить сигнал / Unable to allocate a signal
		Cr	265,975	0,03	Уменьшение сигнала / Signal reduction
		Fe	265,924	0,021	Увеличение сигнала / Signal increase
	271,904	Al	271,896	0,008	Не удается выделить сигнал / Unable to allocate a signal
		Fe	271,903	0,001	Уменьшение сигнала / Signal reduction
	306,471	Al	306,43	0,041	Не удается выделить сигнал / Unable to allocate a signal
		Cr	306,507	0,036	Уменьшение сигнала / Signal reduction
		Fe	306,422	0,049	Увеличение сигнала / Signal increase
Ni		306,462	0,009	Уменьшение сигнала / Signal reduction	
Pd	244,791	Al	245,259	0,468	Не удается выделить сигнал / Unable to allocate a signal
		Cr	244,693	0,098	Увеличение сигнала / Signal increase
		Ni	245,047	0,256	Уменьшение сигнала / Signal reduction
		Pb	244,618	0,173	Увеличение сигнала / Signal increase
	340,458	Al	344,365	3,907	Не удается выделить сигнал / Unable to allocate a signal
		Fe	340,436	0,022	Увеличение сигнала / Signal increase

тральные линии которых близки аналитическим линиям определяемых элементов. Результаты исследования влияния отдельных матричных элементов на качество определения Au, Pt и Pd приведены в работах [Актуганова и др., 2004; Васильева и др., 2010 и др.; Данилова и др., 2021; Qi et al., 2007]. Некоторые из них представлены в таблицах 1 и 2.

Согласно таблице 1 наличие алюминия в аналитической навеске мешает выделению сигнала при любой длине волны резонансной линии. Наличие Fe, Cr, Pb в большинстве случаев приводит к завышению содержания определяемых Pt и Pd. За-

Таблица 2 / Table 2

Аналитические линии Au (определяемый элемент) и мешающих элементов (МЭ) и диапазоны определяемых содержаний (по [Васильева и др., 2010] с дополнениями авторов) / Analytical lines of Au (detectable element) and interfering elements (ME) and ranges of detectable contents (according to [Vasilyeva et al., 2010] with additions by the authors)

Определяемый элемент (ОЭ) / Definition of the measured element (OE)	Длина волны ОЭ, нм / OE wavelength, nm	Мешающий элемент (МЭ) / Interfering element (ME)	Длины волн линий МЭ, нм / Wavelengths of ME lines, nm	Разница длин волн ОЭ и МЭ / The difference in the wavelengths of OE and ME	Диапазон определяемых содержаний Au, г/т / Range of detectable Au contents, g/t
Au	267,595	W	267,586	0,009	< 0,001-0,08
		U	267,591	0,004	
		Nb	267,594	0,001	
		Co	267,598	0,003	
	242,795	SiO ₂	Молекулярная полоса / Molecular band		< 0,001-0,3
	312,278	–	–	–	0,015-10
	274,826	Cr	274,830	0,004	0,05-10
		W	274,800	0,026	
	264,149	–	–	–	0,3-10
	238,775	–	–	–	1-60
268,871	V	268,872	0,001	5-100	

нижение содержаний Pt и Pd происходит в большинстве случаев при наличии в аналитической навеске Ni, а по некоторым аналитическим линиям при наличии Fe и Cr.

Из приведенных таблиц следует вывод, что даже на окончательной инструментальной стадии анализа возможно завышение, занижение или даже не обнаружение Au и ЭПГ в аналитических навесках.

Метод масс-спектрометрии в индуктивно связанной плазме

Второй группой исследователей применялся метод масс-спектрометрии в индуктивно связанной плазме (МС ИСП) анализ для определения Au, Pt и Pd. Этот метод действительно находит все более широкое применение для определения ЭПГ и золота в горных породах [Hall, 1992; Todoli, Mermet, 1999; Nelms, 2005; Agatemor, Beauchemin, 2011; Zereini et al., 2015]. Он основан на использовании индуктивно-связанной плазмы в качестве источника ионов и масс-спектрометра для их разделения и определения. При этом жидкий образец в виде аэрозоля поступает с газом-носителем в плазменную горелку, а энергия, необходимая для возбуждения спектра, передается плазме через индуктивную связь. Достоинства метода – высокая температура плазмы (8000°C), широкий диапазон линейности, высокая точность анализа. Основным недостатком метода является необходимость разложения пробы (перевод в раствор), очень маленькая аналитическая навеска, высокая стоимость.

Таблица 3 / Table 3

Содержания (г/т) благородных металлов в графитсодержащих породах сутырской толщи (Буреинский массив, Россия), определенные методом МС ИСП с различными способами пробоподготовки (по данным [Авдеев и др., 2010] с изменениями с дополнениями авторов) / The contents (g/t) of noble metals in graphite-containing rocks of the Sutyr strata (Bureinsky massif, Russia), determined by the MS ISP method with various methods of sample preparation (according to [Avdeev et al., 2010] with amendments and additions by the authors)

Лаборатория, метод определения, способ разложения пробы / Laboratory, method of determination, method of sample decomposition	Au	Pt	Pd
ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск, МС ИСП: / ITiG FEB RAS, Khabarovsk, MS ISP:			
1) кислотное разложение + соосаждение с Те / 1) acid decomposition + co – deposition with Te	≤ 0,34	≤ 0,01	≤ 0,03
2) кислотное разложение в микроволновом поле + соосаждение с Те / 2) acid decomposition in the microwave field + co – deposition with Te	0,2-1,3	0,02-0,6	≤ 0,3
НИГИ, Индия, МС ИСП: сплавление с NiS + соосаждение с Те / NIGI, India, MS ISP: Fusion with NiS + Co-deposition with Te	≤ 1,43	≤ 0,07	≤ 0,09

Другие достоинства и недостатки метода подробно рассмотрены в работах [Grebneva-Balyuk et al., 2020; Тютюнник и др., 2020; Гребнева-Балюк, 2022 и др.].

При определении Au, Pt, Pd и др. ЭПГ в геологических объектах методом МС ИСП в зависимости от решаемой задачи и минерального состава материала пробы применяют различные способы разложения проб: пробирную плавку на NiS; кислотное разложение в открытых системах; сплавление со щелочными плавнями; кислотное разложение в сосудах под давлением, в качестве которых используют автоклавы с микроволновым нагревом, автоклавы высокого давления, трубки Карриуса [Меньшиков и др., 2016].

В табл. 3 приведены результаты определения Au, Pt и Pd методом МС ИСП при различных способах разложения пробы.

Оказывается, что даже в одной лаборатории при разных способах пробоподготовки результаты различаются на порядок. Еще большая разница наблюдается в результатах разных лабораторий. Это, скорее всего, может быть связано с минеральным составом проб. Менее всего влияние данного фактора испытывает способ пробирной плавки на NiS [Juvonen et al., 2002].

При анализе БМ способом МС ИСП градуировка измерений осуществляется методом изотопного разбавления или внешней градуировки.

Метод изотопного разбавления предполагает наличие как минимум двух стабильных изотопов анализируемого элемента. Он заключается в нахождении отношения концентраций двух изотопов, один из которых обогащен введенной в пробу добавкой данного изотопа. Для введения оптимальной добавки соответствующего изотопа необходимо ориентироваться на «ожидаемую» концентрацию анализируемого элемента.

К основному недостатку изотопного разбавления следует отнести высокий уровень матричного влияния и спектральных полиатомных наложений (интерферен-

ция масс), когда два или более пиков располагаются так близко друг к другу, что может приводить к значительным помехам при определении Au, Pd, Pt и др. ЭПГ. Для отделения матричных элементов от анализируемых Au и ЭПГ обычно применяют ионнообменную хроматографию [Меньшиков и др., 2016]. Однако и этот прием не всегда приводит к желаемому результату, так как вместе с Au и ЭПГ в анализируемый раствор попадают оксидные и аргидные ионы матричных элементов, приводящие также к спектральным наложениям (табл. 4, рис. 1).

Таблица 4 / Table 4

Некоторые используемые изотопы ЭПГ и возможные спектральные наложения оксидных и аргидных ионов матричных элементов (по [Меньшиков и др., 2016] с изменениями и дополнениями авторов) / Some used EPG isotopes and possible spectral overlays of oxide and carbide ions of matrix elements (according to [Menshikov et al., 2016] with changes and additions by the authors)

Анализируемые изотопы / Analyzed isotopes	Возможные спектральные наложения / Possible spectral overlays
^{105}Pd (22,23%) *	$^{65}\text{Cu}^{40}\text{Ar}$, $^{89}\text{Y}^{16}\text{O}$
^{106}Pd (27,33%)	$^{66}\text{Zn}^{40}\text{Ar}$, $^{90}\text{Zr}^{16}\text{O}$, $^{106}\text{Cd}^{16}\text{O}$ (1,22%)
^{194}Pt (32,9%)	$^{154}\text{Gd}^{40}\text{Ar}$, $^{154}\text{Sm}^{40}\text{Ar}$, $^{178}\text{Hf}^{16}\text{O}$
^{195}Pt (33,8%)	$^{155}\text{Gd}^{40}\text{Ar}$, $^{179}\text{Hf}^{16}\text{O}$
^{196}Pt (25,3%)	$^{156}\text{Gd}^{40}\text{Ar}$, $^{180}\text{Hf}^{16}\text{O}$, $^{180}\text{W}^{16}\text{O}$, ^{196}Hg (0.14%)
^{198}Pt (7,2%)	$^{158}\text{Gd}^{40}\text{Ar}$, $^{182}\text{W}^{16}\text{O}$, ^{198}Hg (10%)

* – в скобках представлена распространенность изотопа / the prevalence is shown in parentheses

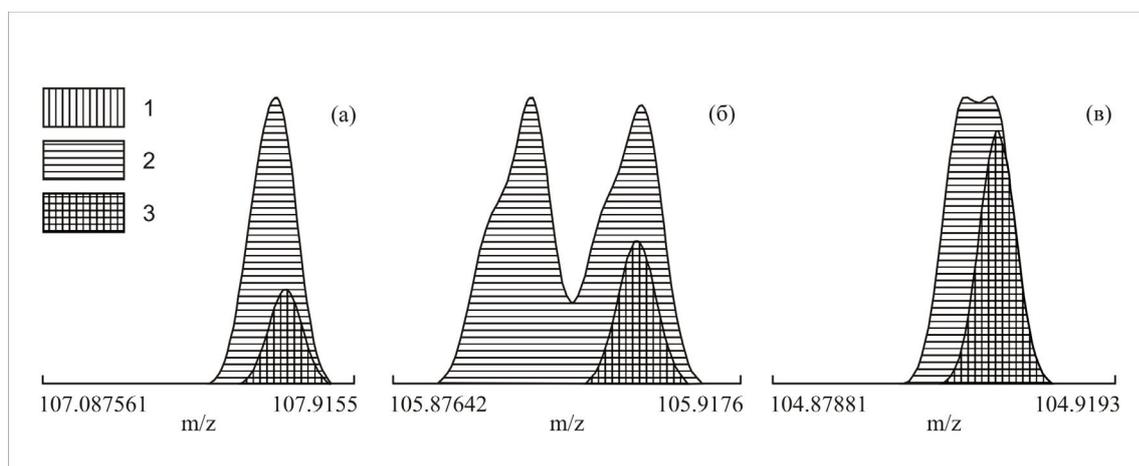


Рис. 1. Наложение масс-спектров оксидных и аргидных ионов матричных элементов: (а) – $^{92}\text{Zr}^{16}\text{O}$ и $^{90}\text{Zr}^{18}\text{O}$ на спектр ^{108}Pd , (б) – $^{90}\text{Zr}^{16}\text{O}$ на спектр ^{106}Pd , (в) – $^{89}\text{Y}^{16}\text{O}$ на спектр ^{105}Pd . Высокое разрешение 10000. По [Berezhnaya et al., 2017] с изменениями и дополнениями авторов. 1 – масс-спектры ^{108}Pd , ^{106}Pd , ^{105}Pd ; 2 – масс-спектры $^{92}\text{Zr}^{16}\text{O}$, $^{90}\text{Zr}^{18}\text{O}$ и $^{89}\text{Y}^{16}\text{O}$; 3 – область наложения масс-спектров /

Fig. 1. Superposition of mass spectra of oxide and argid ions of matrix elements: (a) – $^{92}\text{Zr}^{16}\text{O}$ and $^{90}\text{Zr}^{18}\text{O}$ on the spectrum of ^{108}Pd , (b) – $^{90}\text{Zr}^{16}\text{O}$ on the spectrum of ^{106}Pd , (c) – $^{89}\text{Y}^{16}\text{O}$ on the spectrum of ^{105}Pd . High resolution 10000. By [Berezhnaya et al., 2017] with changes and additions by the authors. 1 – mass spectra of ^{108}Pd , ^{106}Pd , ^{105}Pd ; 2 – mass spectra of $^{92}\text{Zr}^{16}\text{O}$, $^{90}\text{Zr}^{18}\text{O}$ and $^{89}\text{Y}^{16}\text{O}$; 3 – the area of overlapping mass spectra

Метод внешней градуировки основан на построении графика по эталонным растворам Au и ЭПГ. Необходимость выбора в этом случае только одного изотопа для измерения дает больше возможностей избежать спектральных наложений при анализе сложных геологических образцов.

Однако, применение метода внешней градуировки предполагает использование магнитного масс-спектрометра высокого разрешения и высокой чувствительности. Обычно же используется менее чувствительный квадрупольный масс-спектрометр, что не позволяет в полной мере задействовать возможности внешней градуировки для определения ЭПГ в геологических объектах.

Выводы

Оба охарактеризованных инструментальных метода действительно являются лучшими для определения многих химических элементов. Однако прямое определение Au, Pt, Pd и других ЭПГ в геологических объектах этими методами практически невозможно по причине низких концентраций.

Поскольку эти и другие инструментальные методы, обычно применяемые при поисковых и геологоразведочных работах, не могут обеспечить обнаружение природных содержаний Au и ЭПГ непосредственно из материала геологической пробы, возникает необходимость предварительного концентрирования этих элементов с использованием различных приемов. С другой стороны, сложность состава геологических проб является причиной многочисленных влияний со стороны матричных компонентов на аналитические сигналы определяемых элементов, что также требует использования различных приемов избавления от такого влияния.

Способами предварительного выделения и концентрирования Au и ЭПГ с отделением от макрокомпонентов матрицы являются экстракция, соосаждение, сорбция из конечных растворов после кислотного разложения, спекания или сплавления материала пробы. Применение любого из перечисленных способов может приводить к относительному изменению содержаний определяемых Au и ЭПГ в конечной аналитической навеске, к их несоответствию с абсолютными содержаниями в исходной пробе. То есть, использование дополнительных аналитических процедур приводит к дополнительным погрешностям. Таким образом, общая погрешность результата любого метода анализа будет обусловлена не только весьма высокой дисперсией Au и ЭПГ в геологических объектах, но также суммой погрешностей всех необходимых аналитических процедур, включающих разложение пробы, избавление от матричных элементов, концентрирование Au и ЭПГ, измерение содержания элемента при любом способе окончания анализа.

Наиболее надежным способом концентрирования Au, Pt и Pd и одновременного избавления от мешающих матричных элементов является пробирная плавка на NiS с последующим растворением королька благородных металлов.

Высокая дисперсия Au и ЭПГ в геологических объектах требует особого внимания к объему и процедурам отбора, измельчения, квартования и получения конечных аналитических навесок. Все это, а также примененные технологии концентрирования и избавления от матричных элементов должны быть детально описаны и метрологически оценены.

Литература

1. Авдеев Д. В., Бердников Н. В., Черепанов А. А., Золотухина Г. Ф. Об эффективности методов определения благородных металлов в углеродистых сланцах. // *Материалы XIX Междунар. Черняевской конф. по химии, аналитике и технологиям платиновых металлов.* – Новосибирск. – 2010. – Ч. I. – С. 75-76.
2. Актуганова К. В., Ширяева О. А., Карпов Ю. А. и Дальнова Ю. С. Сорбционно-атомно-абсорбционное определение металлов платиновой группы, золота и серебра в медно-никелевых продуктах. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2004. – Т. 70. – С. 13-18.
3. 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. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-2-34-40
4. Богущ И. А., Бурцев А. А., Рябов Г. В., Черкашин В. И. Благородные металлы черносланцевого комплекса Урупо-Лабинского района Северного Кавказа. // *Грозненский естественнонаучный бюллетень.* – 2016. – №3 (3). – С. 25-32.
5. Богущ И. А., Рябов Г. В., Черкашин В. И. Генезис и рудоносные структуры чучкурского месторождения благородных металлов Северного Кавказа. // *Геология и геофизика Юга России.* – 2020. – Т. 10. №1. – С. 81-95. DOI: 10.23671/VNC. 2020.1.59067
6. Богущ И. А., Рябов Г. В., Черкашин В. И., Исаева Н. А. Геохимические особенности рудоносных черных сланцев Северного Кавказа. // *Геология и геофизика Юга России.* – 2019. – Т. 9. №3. – С. 6-17. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36477
7. Васильева И. Е., Пожидаев Ю. Н., Власова Н. Н., Воронков М. Г., Филипченко Ю. А. Сорбционно-атомно-эмиссионное определение золота, платины и палладия в горных породах и рудах с использованием сорбента ПСТМ-3Т. // *Аналитика и контроль.* – 2010. – Т. 14. №1. – С. 16-24.
8. Гончаров В. И., Богущ И. А., Бурцев А. А., Васьков И. М. Поисковые критерии и перспективы благородных металлов девонских черносланцевых толщ на Северном Кавказе. // *Вестник Владикавказского научного центра.* – 2007. – Т. 7. №3. – С. 19-24.
9. Гребнева-Балюк О. Н. Новый способ нахождения пределов определения элементов, оценки динамического диапазона определяемых содержаний и выявления матричных и межэлементных влияний в спектральном анализе (атомно-абсорбционная спектрометрия и ИСП-методы анализа). // *Журнал аналитической химии.* – 2022. – Т. 77. №1. – С. 53-69. DOI: 10.31857/S0044450222010042
10. Гурбанов А. Г., Богатииков О. А., Лексин А. Б. и др. Первые данные о вариациях содержаний макро-, микроэлементов и благородных металлов в вертикальных разрезах в промышленных отходах Фиагдонского хвостохранилища (Республика Северная Осетия-Алания). // *Доклады Академии наук.* – 2019. – Т. 487. №1. – С. 69-72. DOI: 10.31857/S0869-5652487169-72
11. 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. – Т. 11. №2. – С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC. 2021.41.26.001
12. Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Газеев В. М., Лексин А. Б., 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.* – 2020. – Т. 10. №4. – С. 6-29. DOI: 10.46698/VNC. 2020.37.45.001
13. Давыденко Д. Б., Парада С. Г. Геолого-геофизические признаки полигенно-полихронной природы золоторудных проявлений Донецкого авлакогена. // *Геология и геофизика Юга России.* – 2019. – Т. 9. №4. – С. 13-27. DOI: 10.23671/VNC. 2019.4.44485

14. Данилова Ю. В., Васильева И. Е., Шабанова Е. В., Савельева В. Б., Данилов Б. С. Благородные металлы в породах сарминской серии: фазовый состав и элементные ассоциации. // *Геохимия*. – 2021. – Т. 66. №3. – С. 262-274. DOI: 10.31857/S0016752521010027
15. Курбанов М. М., Богуш И. А., Бурцев А. А. Геохимические особенности золотонесущего сульфидного оруденения семейства черносланцевых формаций в горном Дагестане. // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2011. – №5 (163). – С. 106-109.
16. Меньшиков В. И., Власова В. Н., Ложкин В. И., Сокольникова Ю. В. Определение элементов платиновой группы в горных породах методом ИСП-МС с внешней градуировкой после отделения матричных элементов на катионите КУ-2-8. // *Аналитика и контроль*. – 2016. – Т. 20. №3. – С. 190-201. DOI: 10.15826/analitika. 2016.20.3.003
17. Парада С. Г. Перспективные типы месторождений и рудопроявлений золота Юга России. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2017. – №1. – С. 57-72. DOI: 10.23671/VNC. 2017.1.9479
18. Тютюнник О. А., Набиуллина С. Н., Аносова М. О., Кубракова И. В. Определение следовых содержаний элементов платиновой группы и золота в ультраосновных породах с использованием сорбентов AG-X8 И LN-resin методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. // *Журнал аналитической химии*. – 2020. – Т. 75. №6. – С. 527-536. DOI: 10.31857/S0044450220060183
19. Черкашин В. И., Богуш И. А., Рябов Г. В., Исаева Н. А. Благородные металлы осадочных комплексов фанерозоя Северного Кавказа // *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. – 2021. – №3 (86). – С. 16-22. DOI: 10.33580/2541-9684-2021-86-3-16-22
20. Agatemor C., Beauchemin D. Matrix effects in inductively coupled plasma mass spectrometry: A review. // *Anal. Chim. Acta*. – 2011. – Vol. 706. – pp. 66.
21. Berezhnaya E. D., Dubinin A. V. Determination of the platinum-group elements and gold in ferromanganese nodule reference material NOD-A-1. // *Geochemistry International*. – 2017. – Vol. 55. No. 2. – pp. 218-224.
22. Grebneva-Balyuk O. N., Kubrakova I. V. Determination of platinum group elements in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry: possibilities and limitations. // *Journal of analytical chemistry*. – 2020. – Vol. 75. No. 3. – pp. 275-285. DOI: 10.1134/S1061934820030065
23. Hall G. E. M. Inductively coupled plasma mass spectrometry in geoanalysis. // *J. Geochem. Explor.* – 1992. – Vol. 44. – pp. 201.
24. Nelms S. M. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Handbook*. // Blackwell Publishing, Oxford, 2005. – 485 p.
25. Juvonen R., Lakomaa T., Soikkeli L. Determination of gold and the platinum group elements in geological samples by ICPMS after nickel sulphide fire assay: difficulties encountered with different types of geological samples. // *Talanta*. – 2002. – Vol. 58. – pp. 595-603.
26. Qi L., Zhou M. F., Wang C. Y., Sun M. Evaluation of a technique for determining Re and PGEs in geological samples by ICP-MS coupled with a modified Carius tube digestion. // *Geochem. J.* – 2007. – Vol. 41. No. 6. – pp. 407-414. DOI: 10.2343/geochemj. 41.407
27. Todoli J.-L., Mermet J.-M. Acid interferences in atomic spectrometry: Analyte signal effects and subsequent reduction. // *Spectrochim. Acta*. – 1999. – Vol. 54. – pp. 895.
28. Zereini F., Clare L. S., Wiseman C. L. S. *Platinum Metals in the Environment*. – Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2015. – 492 p.

References

1. Avdeev D. V., Berdnikov N. V., Cherepanov A. A., Zolotukhina G. F. On the effectiveness of methods for determining noble metals in carbonaceous shales. In: Proceedings of the XIX Intern. Chernyaev Conf. in chemistry, analytics and technologies of platinum metals. Novosibirsk. 2010. Part I. pp. 75-76. (In Russ.)
2. Aktuganova K. V., Shiryaeva O. A., Karpov Yu. A., Dalnova Yu. S. Sorption-atomic-absorption determination of platinum group metals, gold and silver in copper-nickel products. Factory laboratory. material diagnostics. 2004. Vol. 70. pp. 13-18. (In Russ.)
3. Bogush I. A., Burtsev A. A., Ryabov G. V. Minerals and sources of precious metals in the North Caucasus. Science of the South of Russia. 2017. Vol. 13. No. 2. pp. 34-40. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-2-34-40. (In Russ.)
4. Bogush I. A., Burtsev A. A., Ryabov G. V., Cherkashin V. I. Precious metals of black shale complex of Urup Labinsky region of the North Caucasus. Grozny Natural Science Bulletin. 2016. No. 3. Issue 3. pp. 25-32. (In Russ.)
5. Bogush I. A., Ryabov G. V., Cherkashin V. I. Genesis and ore-bearing structures of the Chuchukur noble metals deposit of the North Caucasus. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 81-95. DOI: 10.23671/VNC. 2020.1.59067. (In Russ.)
6. Bogush I. A., Ryabov G. V., Cherkashin V. I., Isaeva N. A. Geochemical features of metalliferous black shale of North Caucasus. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 6-17. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36477 (In Russ.)
7. Vasilyeva I. E., Pozhidaev Yu. N., Vlasova N. N., Voronkov M. G., Philipchenko Yu. A. Sorption-atomic-emission determination of gold, platinum and palladium in rocks and ores using sorbent PSTM-3T. Analytics and Control. 2010. Vol. 14. No. 1. pp. 16-24. (In Russ.)
8. Goncharov V. I., Bogush I. A., Burtsev A. A., Vaskov I. M. Search criteria and prospects for noble metals of the Devonian black shale strata in the North Caucasus. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2007. Vol. 7. No. 3. pp. 19-24. (In Russ.)
9. Grebneva-Balyuk O. N. A new method for finding the limits of detection of elements, assessing the dynamic range of determined contents and identifying matrix and interelement effects in spectral analysis (atomic absorption spectrometry and ICP analysis methods). Zhurnal Analiticheskoi Khimii. 2022. Vol. 77. No. 1. pp. 53-69. DOI: 10.31857/S0044450222010042. (In Russ.)
10. Gurbanov A. G., Bogatikov O. A., Leksin A. B., Gazeev V. M., Lolaev A. B., Ilaev V. E., Gurbanova O. A. First data on variations in the contents of macro- and microelements and precious metals in vertical sections in industrial wastes of the Fiagdon tailing dump (Republic of North Ossetia – Alania). Doklady Earth Sciences. 2019. Vol. 487. No. 1. pp. 782-785. DOI: 10.1134/S1028334X1907002X (In Russ.)
11. 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. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 6-21. DOI: 10.46698/VNC. 2021.41.26.001. (In Russ.)
12. Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Leksin 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 Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 6-29. DOI: 10.46698/VNC. 2020.37.45.001. (In Russ.)
13. Davydenko D. B., Parada S. G. Geological and geophysical features of the polygenic-polychronous nature of the gold ore manifestations of Donetsk aulacogen. Geology of the South of Russia. 2019. Vol 9. No. 4. pp. 13-27. (in Russ.) DOI: 0.23671/VNC. 2019.4.44485.

14. Danilova Y.V., Savelyeva V.B., Danilov B.S., Vasil'eva I. E., Shabanova E.V. Noble metals in rocks of the Sarma group: phase composition and element associations. *Geochemistry International*. 2021. Vol. 59. No. 3. pp. 301-313. DOI: 10.1134/S001670292101002X
15. Kurbanov M.M., Bogush I.A., Burtsev A.A. Geochemical features of gold-bearing sulfide mineralization of the family of black shale formations in mountainous Dagestan. *News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science*. 2011. No. 5. pp. 106-109. (In Russ.)
16. Men'shikov V. I., Vlasova V.N., Lozhkin V.I., Sokol'nikova Iu.V. Determination of platinum-group elements in rocks by ICP-MS with external calibration after cation exchange separation of matrix elements by KU-2-8 resin. *Analytics and Control*. 2016. Vol. 20. No. 3. pp. 190-201. DOI: 10.15826/analitika. 2016.20.3.003 (In Russ.)
17. Parada S. G. Promising types of golden deposits and ore manifestations of Russian South. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2017. No. 1. pp. 57-72. DOI: 10.23671/VNC. 2017.1.9479 (In Russ.)
18. Tyutyunnik O.A., Nabiullina S.N., Anosova M. O., Kubrakova I.V. Determination of trace amounts of platinum group elements and gold in ultrabasic rocks by inductively coupled plasma mass spectrometry using Ag-X8 and LN-resin sorbents. *Journal of Analytical Chemistry*. 2020. Vol. 75. No. 6. pp. 769-777. DOI: 10.1134/S1061934820060179 (In Russ.)
19. Cherkashin V.I., Bogush I.A., Ryabov G.V., Isaeva N.A. Noble metals of sedimentary complexes of the Phanerozoic of the North Caucasus. *Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS*. 2021. No. 3. Issue 86. pp. 16-22. (In Russ.)
20. Agatemor C., Beauchemin D. Matrix effects in inductively coupled plasma mass spectrometry: A review. *Anal. Chim. Acta*. 2011. Vol. 706. pp. 66.
21. Berezhnaya E. D., Dubinin A. V. Determination of the platinum-group elements and gold in ferromanganese nodule reference material NOD-A-1. *Geochemistry International*. 2017. Vol. 55. No. 2. pp. 218-224.
22. Grebneva-Balyuk O.N., Kubrakova I.V. Determination of platinum group elements in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry: possibilities and limitations. *Journal of analytical chemistry*. 2020. Vol. 75. No. 3. pp. 275-285. DOI: 10.1134/S1061934820030065
23. Hall G.E. M. Inductively coupled plasma mass spectrometry in geoanalysis. *J. Geochem. Explor*. 1992. Vol. 44. pp. 201.
24. Nelms S.M. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Handbook*. Blackwell Publishing, Oxford, 2005. 485 p.
25. Juvonen R., Lakomaa T., Soikkeli L. Determination of gold and the platinum group elements in geological samples by ICPMS after nickel sulphide fire assay: difficulties encountered with different types of geological samples. *Talanta*. 2002. Vol. 58. pp. 595-603.
26. Qi L., Zhou M.F., Wang C.Y., Sun M. Evaluation of a technique for determining Re and PGEs in geological samples by ICP-MS coupled with a modified Carius tube digestion. *Geochem. J.* 2007. Vol. 41. No. 6. pp. 407-414. DOI: 10.2343/geochemj. 41.407
27. Todoli J.-L., Mermet J.-M. Acid interferences in atomic spectrometry: Analyte signal effects and subsequent reduction. *Spectrochim. Acta*. 1999. Vol. 54. pp. 895.
28. Zereini F., Clare L.S., Wiseman C.L. *S. Platinum Metals in the Environment*. Berlin, Heidelberg. Springer Verlag, 2015. 492 p.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК553.982

DOI: [10.46698/VNC.2022.80.35.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.80.35.009)

Оригинальная статья

Некоторые закономерности формирования и распространения рифогенных построек в триасовых отложениях на территории Восточного Предкавказья в связи с нефтегазоносностью

В. М. Харченко , К. И. Черненко , Н. В. Еремина , Д. Д. Самусев 

¹Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355009,
г. Ставрополь, пр-т Кулакова 16/1, корп. 16, kchernenko@ncfu.ru

Статья поступила: 15.07.2022, доработана: 17.08.2022, одобрена к публикации: 24.08.2022

Резюме: Актуальность работы. Объектом исследования являются отложения триасового возраста, входящего в состав пермо-триасового нефтегазоносного комплекса, который еще несколько десятилетий назад представлялся одним из основных объектов промышленной разработки Восточного Предкавказья. В связи с тем, что две трети ресурсов углеводородного сырья этого комплекса не освоены, необходимо выявить закономерности формирования карбонатных коллекторов рифогенного генезиса, а также распространения и условий образования полей нефтегазоносности. Учитывая то, что Восточное Предкавказье имеет статус «старого» нефтегазодобывающего региона, где не рентабельно применение дорогостоящих технологий, целесообразно использование традиционных и нетрадиционных малозатратных подходов. **Целью исследования** является изучение закономерностей формирования и распространения карбонатных коллекторов рифогенного генезиса, выявление факторов, влияющих на их образование, рассмотрение ассоциирующей с ними нефтеносности. **Методы исследования.** Цели и задачи работы предопределили комплексный характер исследования, включающий в себя известные традиционные и малоизвестные нетрадиционные теоретические основы и методы научных исследований. К традиционным методам относятся анализ, систематизация и обобщение геолого-геофизических данных, системно-аэрокосмический метод, включающий классическую технологию дешифрирования и интерпретации космических снимков. К малоизвестным нетрадиционным теоретическим основам, имеющим высокую степень оригинальности и новизны, относятся теория Б. А. Соколова с конкретным ее воплощением в форме «дерева» на основе интерпретаций структур центрального типа (СЦТ по В. М. Харченко), «геосолитонная» теория Р. М. Бембеля и несколько доработанная и адаптированная для триасового периода теория Ч. Дарвина о происхождении и распространении рифогенных построек, приуроченности их к вулканическим центрам. **Результаты работы.** Для двух периодов интенсивной вулканической активности (ранний-средний и поздний триас) установлена закономерная приуроченность вулканических построек триаса к глубинным тектоническим нарушениям преимущественно субширотного и диагонального простирания на границах различных региональных структур первого порядка. Проведено уточнение местоположения вулканоплутонических центров триаса на территории Восточного Предкавказья. Проведено изучение фондовых материалов с описанием ядра нефтекумских отложений Величаевско-Максимокумского вала Восточного Предкавказья. На территории Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения зафиксирован еще один палеовулкан – на площади Правобережная. Установлена связь вулканических центров триасового времени Восточного Предкавказья с рифогенными образованиями и зонами распространения залежей углеводородов (УВ).

Ключевые слова: триас, геодинамика, вулканизм, разрывные нарушения, космические снимки, структуры центрального типа (СЦТ), рифогенные постройки, залежи углеводородов.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-35-90028.

Для цитирования: Харченко В. М., Черненко К. И., Еремина Н. В., Самусев Д. Д. Некоторые закономерности формирования и распространения рифогенных построек в триасовых отложениях на территории Восточного Предкавказья в связи с нефтегазонасностью. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 133-145. DOI: 10.46698/VNC. 2022.80.35.009.

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

[DOI: 10.46698/VNC. 2022.80.35.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.80.35.009)

Original paper

Some patterns of formation and distribution of reef buildups in Triassic deposits on the territory of the Eastern Fore-Caucasus in connection with oil-and-gas potential

V. M. Kharchenko , K. I. Chernenko , N. V. Yeriomina , D. D. Samusev 

¹North-Caucasus Federal University, 16/1 Kulakova Avenue, Stavropol 355009, Russian Federation, e-mail: kchernenko@ncfu.ru

Received: 15.07.2022, revised: 17.08.2022, accepted: 24.08.2022

Abstract: Relevance. The object of study is the Triassic deposits, which are part of the Permian-Triassic oil-and-gas complex, which was considered one of the main objects of industrial development in the Eastern Fore-Caucasus a few decades ago. Due to the fact that two thirds of the hydrocarbon resources of this complex have not been developed, it is necessary to identify the patterns of formation of carbonate reservoirs of reef genesis, as well as the distribution and conditions for the generation of oil-and-gas fields. Considering that the Eastern Fore-Caucasus has the status of an «old» oil-and-gas producing region, where the use of expensive technologies is not profitable, it is advisable to use traditional and non-traditional low-cost approaches. **The aim of the study** is to investigate the patterns of formation and distribution of carbonate reservoirs of reef genesis, to identify the factors influencing on their formation, and to consider the oil content associated with them. **Methods.** The goals and objectives of the work predetermined the complex nature of the study, which includes well-known traditional and little-known non-traditional theoretical basics and methods of scientific research. The traditional methods are analysis, systematization and generalization of geological and geophysical data, the system-aerospace method, which includes the classical technology of interpretation of satellite images. The little-known non-traditional theoretical foundations, which have a high degree of originality and novelty, include the theory of B. A. Sokolov with its specific embodiment in the form of a «tree» based on interpretations of structures of the central type (SCT according to V. M. Kharchenko), the «geosoliton» theory of R. M. Bembel and Ch. Darwin's theory of the origin and distribution of reef structures, their confinement to volcanic centers, somewhat modified and adapted for the Triassic period. **Results.** A regular confinement of Triassic volcanic structures to deep tectonic faults of predominantly sublatitudinal and diagonal strike at the boundaries of various first-order regional structures has been established for two periods of intense volcanic activity (Early-Middle and Late Triassic). The location of the volcano-plutonic centers of the Triassic in the territory of the Eastern Fore-Caucasus has been refined. A study of

stock materials with a description of the core of the Neftekumsk deposits of the Velichayevsky-Maksimokumsky swell of the Eastern Fore-Caucasus was carried out. On the territory of the Zimne-Stavkinsko-Pravoberezhnoye field, another paleovolcano was recorded – on the Pravoberezhnaya area. A connection has been established between the volcanic centers of the Triassic time of the Eastern Fore-Caucasus with reef formations and zones of distribution of hydrocarbon (HC) deposits.

Key words: Triassic, geodynamics, volcanism, faults, satellite images, structures of central type (CST), reef buildups, hydrocarbon deposits.

Acknowledgments: *The reported study was funded by RFBR according to the research project №20-35-90028.*

For citation: Kharchenko V. M., Chernenko K. I., Yeriomina N. V., Samusev D. D. Some patterns of formation and distribution of reef buildups in Triassic deposits on the territory of the Eastern Fore-Caucasus in connection with oil-and-gas potential. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2022. 12 (3): 133-145. DOI: 10.46698/VNC. 2022.80.35.009.

Введение

Актуальность работы. Объектом исследования являются отложения триасового возраста, которые входят в состав пермо-триасового нефтегазоносного комплекса, являющегося одним из основных объектов промышленной разработки Восточного Предкавказья. Две трети ресурсов углеводородного сырья этого комплекса пока не освоены, для всех продуктивных пластов характерна геологическая и технологическая неоднородность (степень выработанности объектов и участков).

Для повышения уровня добычи углеводородного сырья в общем балансе топливно-энергетического комплекса России важным фактором является обоснованная оценка и прогноз нефтегазоносности не только новых перспективных регионов, но и вовлечение в промышленное освоение невыработанных остаточных запасов и пропущенных недоразведанных участков разрабатываемых месторождений в старых добывающих регионах.

Для эффективных поисков, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, в том числе залежей нефти и газа, первостепенное значение имеет выявление закономерностей образования и распространения на территории Восточного Предкавказья нефтематеринских пород, первичных и (или) вторичных коллекторов.

В настоящее время быстрое истощение залежей и снижение экономических показателей на разрабатываемых месторождениях ряд ученых связывает с ошибочностью концепции происхождения и эволюции углеводородных залежей [Бембель и др., 2003, 2006].

Для достижения рентабельности геологоразведочных работ (ГРП), а также эффективного геологического сопровождения разработки залежей углеводородов актуальным является использование не только известных традиционных, но и малоизвестных нетрадиционных теоретических основ и методов научных исследований.

Материалы и методы исследований

Представленная работа является результатом научного исследования, выполненного в период с 2018 по 2022 годы. В качестве информационных источников использованы результаты изучения кернового материала, данные бурения и геолого-промысловые данные по залежам нефти, геофизические исследования глубоких скважин, данные сейсморазведки, космоснимки различных масштабов, сейсмогео-

логические профили, структурные карты и карты изопахит эффективных нефтенасыщенных толщин залежей, а также многочисленные публикации по исследуемой проблеме.

Применялись в процессе исследования анализ, систематизация и обобщение геологических, геофизических и промысловых данных, системно-аэрокосмический метод, включающий как классическую технологию дешифрирования и интерпретации космических снимков, так и выделение объектов на основе интерпретации структур центрального типа (СЦТ).

Результаты работы и их обсуждение

Теоретическими основами исследования являются: ротационная концепция тектогенеза, флюидодинамическая теория Б. А. Соколова, концепция природы структур центрального типа В. М. Харченко, теория «геосолитонов» Р. М. Бембеля.

В первую очередь применялась известная теория Б. А. Соколова с конкретным ее воплощением в форме «дерева» на основе интерпретаций СЦТ (рис. 1) [Соколов, Абля, 1999]. Концепция природы структур центрального типа пока малоизвестна.

В структуре флюидодинамической модели Б. А. Соколова выделяется «корневая система», являющаяся очагом нефтегазообразования. «Ствол» и «ветви» дерева являются путями миграции, «листья» и «плоды» – ловушками углеводородов. Малоизвестной нетрадиционной теоретической основой является концепция природы структур центрального типа В. М. Харченко (рис. 2), которая представляет собой модель образования радиально-концентрических структур центрального типа [Харченко, Лапта, 2021]. Эта модель является инновационной практической реализацией ряда теорий, в частности согласуется с известной теоретической флюидодинамической моделью Б. А. Соколова. Данная модель предоставляет возможность роста генерационного потенциала нефтематеринских толщ каждого энергетического уровня за счет влияния флюидных потоков из нижележащих горизонтов. Это может привести к локальной инициализации вещества, не достигшего уровней генерации

УВ в основном своем объеме. Также существенно может повлиять на оценку количества ресурсов наличие нефтегазоносных пород в фундаменте.

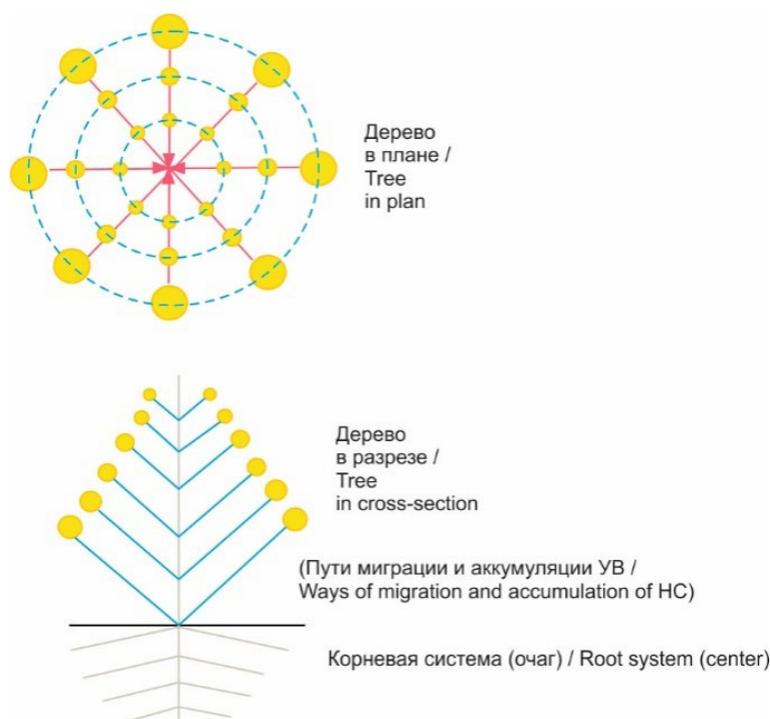


Рис. 1. Абстрактная модель (дерево) образования, миграции и аккумуляции углеводородов по Б. А. Соколову (2002 г.) / Fig. 1. Abstract model (tree) of formation, migration and accumulation of hydrocarbons according to B. A. Sokolov (2002)

СЦТ (кольцевые структуры по Н. И. Корчугановой, А. К. Корсакову [Корчуганова, Корсаков, 2009], В. М. Харченко [Харченко, Лапта, 2021]) представляют собой современные, новейшие или древние флюидодинамические системы (следы древних, молодых, новейших, современных и даже будущих землетрясений и вулкано-плутонической деятельности) с характерными концентрическими и радиальными зонами трещин, разломов или даек конической формы и с обязательной центральной симметрией (в форме круга в плане и конуса в объеме). Эти различные по размеру структуры от десятков метров до первых тысяч километров в диаметре, образовались, как в результате импульсной разрядки тектонических напряжений, так и постоянного действия современных нормальных и максимальных касательных напряжений под углом 45 градусов по отношению к нормальным, откуда очевидно равенство радиусов СЦТ и глубин до геолого-геофизических разделов. Выявленная закономерность, которая подтверждается известным в физике законом скалывающих напряжений, позволяет строить геолого-тектонические модели с возможными залежами УВ на основе интерпретации структур центрального типа в плане и разрезе (рис. 2). Если рассматривать СЦТ как аналог модели очага землетрясений, то в зонах сжатия возникают благоприятные термобарические условия для генерации углеводородов, которые после своего образования мигрируют в соседние зоны растяжения и при соответствующих условиях (наличию коллекторов и покрышек) здесь возможно формирование залежей нефти и газа.

Вопросами влияния геотектоники, вулканизма и особенностей литогенеза на образование и накопление углеводородов, в частности, на закономерности формирования и распространения карбонатных, магматических и смешанных карбонатно-кремнисто-вулканокластических коллекторов, занимался ряд исследователей. В исследовании [Cardello et al., 2020] установлено, что кластеризация центров извержения контролируется тектоническими и геодинамическими особенностями и связана с рифтовыми разрывными нарушениями земной коры и внедрением магмы. В работе [Guang et al., 2011] рассмотрены условия формирования и распределения залежей неорганического газа (CO_2) и залежей органического углеводородного газа. Распределение систем разрывных нарушений, являющихся источниками газа, и дегазация мантийных вулканов, являются двумя основными факторами, контролирующими обогащение, миграцию и накопление резервуаров неорганического газа CO_2 . Погребенные вулканические системы изучались из-за их потенциала для поиска и разведки углеводородов. Тектонические нарушения связывают нефтематеринские породы с резервуарами верхней коры выветривания и контролируют распределение нефти [Hu et al., 2021]. Широко распространенная вторичная пористость и трещиноватость увеличивают коллекторский потенциал в вулканических породах и связанных с ними эпикластических отложениях [Kroeger et al., 2022]. В исследовании [Wei et al., 2022] рассматривается диагенез смешанных пород и его влияние на качество коллектора, в частности, влияние вулканических компонентов на потенциальное накопление углеводородов в озерных смешанных породах. Вулканические компоненты косвенно повышают первоначальную первичную продуктивность, что делает смешанные залежи потенциальным объектом для образования и накопления УВ.

Карбонатные коллектора рифогенного типа могут быть обусловлены вулканической активностью. По теории Ч. Дарвина о происхождении и распространении рифогенных построек, они связаны с вулканическими центрами. При изучении об-

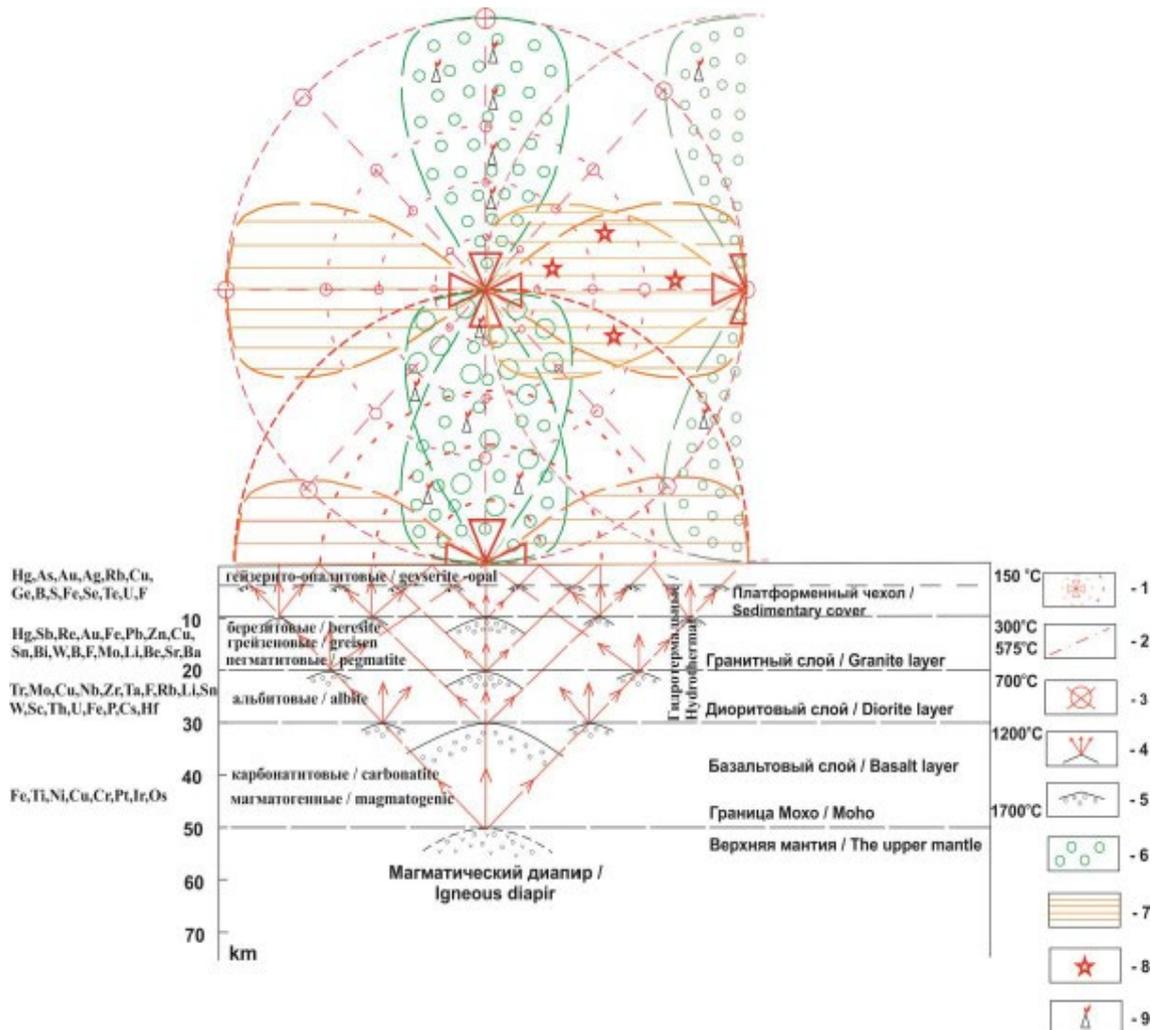


Рис. 2. Модель образования радиально-концентрических структур центрального типа по В. М. Харченко (2009 г.).

Условные обозначения: 1 – геодинамические центры СЦТ и их контуры; 2 – линейменты или тектонические нарушения; 3 – субвертикальные зоны деструкции; 4 – флюидопотоки и пути их миграции согласно распределению тектонических напряжений; 5 – залежи УВ в зоне катагенеза; 6 – зона растяжения; 7 – зона сжатия; 8 – возможные очаги землетрясения; 9 – возможные залежи УВ в зоне субвертикальной деструкции /

Fig. 2. Model of the formation of radial-concentric structures of the central type according to V. M. Kharchenko (2009).

Legends: 1 – geodynamic centers of SCT and their contours; 2 – lineaments or tectonic faults; 3 – subvertical zones of destruction; 4 – fluidflows and ways of their migration according to distribution of tectonic stresses; 5 – hydrocarbon deposits in catagenesis zone; 6 – stretching zone; 7 – compression zone; 8 – possible earthquake sources; 9 – possible hydrocarbon deposits in zone of subvertical destruction

разования атоллов необходимо учитывать две основные предпосылки: что платформы, на которых росли мадрепоровые кораллы, постепенно опускались, и что коралловые постройки и рифы росли вверх с такой же скоростью, с какой происходило опускание платформ [Darwin, 1842; Дарвин, 1936].

Данная теория так же объясняет образование не только атоллов, но и других типов рифов. И береговые, и барьерные рифы, и атоллы, по Ч. Дарвину, представляют собой последовательные этапы развития одной и той же коралловой постройки.

Ч. Дарвин также выявил условия, благоприятные для роста коралловых рифов – наличие питательных веществ, свет, определенная температура (20°C), определенный уровень моря и соленость воды. Но Ч. Дарвином не было учтено еще одно немаловажное условие – это отсутствие глинистых частиц, которые «загрязняют» море и препятствуют росту коралловых рифов. В условиях вулканических построек глинистые частицы практически отсутствуют.

Вулканические постройки являются классическим примером СЦТ и являются, по представлению авторов, «корнями деревьев», то есть корнями нефтегазообразования согласно теории Б. А. Соколова, к которым закономерно приурочиваются рифогенные образования.

Как считают сторонники геосолитонной концепции образования залежей УВ, практически все известные современные и древние рифы и карбонатные постройки находятся на геосолитонных трубках, по которым не только поставляются необходимые для жизни вещество и энергия, но и происходит дилатансионный диапиризм, поднимающий морское дно с глубины в несколько километров до дневной поверхности. Геосолитонный механизм приводит к формированию локальных очагов, улучшенных коллекторских свойств и, как следствие, локальных высокодебитных участков, как в нефтегазоносном бассейне, так и внутри отдельных месторождений [Бембель и др., 2003, 2006].

Изучением вулканизма триасовых отложений Восточного Предкавказья занимались многие исследователи, в том числе Б. П. Назаревич, П. Л. Тихомиров и Ф. Шало-Прат [Tikhomirov et al., 2004]. Ими были выявлены два периода интенсивной вулканической активности в периоды раннего-среднего и позднего триаса. Первый период, более ранний, включает субаэральные эксплозивные извержения риолитовой магмы. Второй период – подводные эффузивные извержения базальтов и риолитов внутри активно опускающегося прогиба. Многочисленные несогласия в пределах вулканогенно-осадочной толщи свидетельствуют о тектонически активной обстановке [Neleпов et al., 2021].

При анализе палеогеологических и тектонических карт, составленных Б. П. Назаревичем [Tikhomirov et al., 2004], А. И. Летавиным [Летавин и др., 1987], А. Ф. Лопатиным и др., авторами настоящего исследования выявлена закономерная приуроченность вулканических построек триаса к глубинным разрывным нарушениям субширотного и диагонального простирания на границах различных региональных структур первого порядка (кряж Карпинского, зоны Манычских прогибов и т. д.). На рисунке 3 приведено расположение 17 таких вулканов: 1 – Голубинский, 2 – Синебугровский, 3 – Арбалинский, 4 – Светлоярский, 5 – Андра-Атинский, 6 – Ахтынский, 7 – Зурмутинский, 8 – Южно-Чернолесский, 9 – Прасковейский, 10 – Ачикулакский, 11 – Наримановский, 12 – Отказненский, 13 – Каясулинский, 14 – Тукуйский, 15 – Березкинский, 16 – Бурунный [Туртуков, 1991], 17 – Правобережный.

В районе исследования по данным бурения выявлены вулканоплутонические центры триасового времени, с которыми связана нефтегазоносность триасовых отложений – на месторождениях Гороховское, Безводненское, Величавское, Поварковское, Зимняя Ставка и Русский Хутор [Харченко и др., 2019].

Выделенные кольцевые формы имеют радиус 75 км, и согласно закону скалывающих напряжений [Харченко и др., 2019; Велиев, 2021; Хасанов и др., 2020; Гзовский, 1975], глубина корня СЦТ определяется ниже границы Мохо (находящейся в исследуемом районе на глубинах 39-43 км [Винник и др., 2021; Егоркин и др., 2007]) на более чем 30 км.

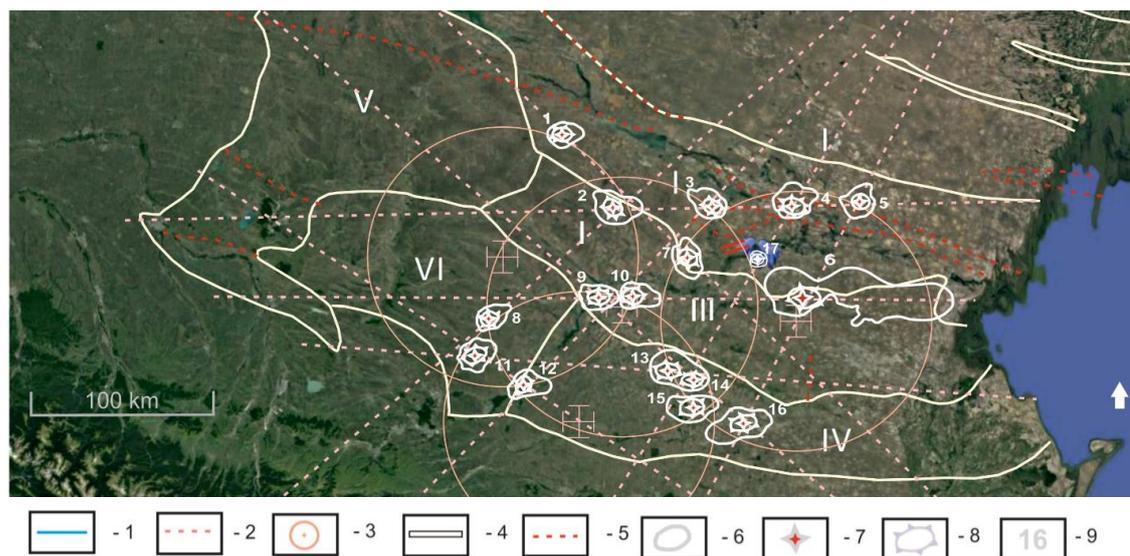


Рис. 3. Схема приуроченности триасового вулканизма Восточного Предкавказья к вероятным глубинным тектоническим нарушениям, узлам их пересечения и границам различных региональных структур первого порядка. Предполагаемые четыре центра СЦТ являются центрами древних супервулканов, а выявленные вулканические постройки – их сателлитами, закономерно расположенными по окружности.

Условные обозначения: 1 – границы горного отвода; 2 – линияменты (вероятные глубинные тектонические нарушения) по В. М. Харченко; 3 – СЦТ; 4 – границы тектонических элементов I порядка: I – Кряж Карпинского, II – зона Манычских прогибов, III – Прикумская система поднятий, IV – Ногайская ступень, V – Ставропольский свод, VI – Восточно-Ставропольская впадина; 5 – разрывные нарушения по А. И. Летавину; 6 – локальные поднятия; зоны: 7 – нецковые фации; 8 – прикратерная; 9 – вулканы: 1 – Голубинский, 2 – Синебугровский, 3 – Арбалинский, 4 – Светлоярский, 5 – Андра-Атинский, 6 – Ахтынский, 7 – Зурмутинский, 8 – Южно-Чернолесский, 9 – Прасковейский, 10 – Ачикулакский, 11 – Наримановский, 12 – Отказненский, 13 – Калсулинский, 14 – Тукуйский, 15 – Березкинский, 16 – Бурунный [Туртуков, 1991], 17 – Правобережный (К. И. Черненко, Н. В. Еремина, В. М. Харченко, 2022 г.) /

Fig. 3. Scheme of confinement of Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus to probable deep tectonic faults, nodes of their intersection and to the boundaries of various regional structures of the first order. The proposed four centers of SCT are the centers of ancient supervolcanoes, and the identified volcanic structures – their satellites, regularly located around the circumference.

Legends: 1 – property line; 2 – lineaments (probable deep tectonic faults) according to V. M. Kharchenko; 3 – SCT; 4 – boundaries of tectonic elements of the 1st order: I – Ridge of Karpinsky, II – zone of the Manych troughs, III – Prikumsky uplift system, IV – Nogai stage, V – Stavropol dome, VI – East-Stavropol depression; 5 – faults according to A. I. Letavin; 6 – local uplifts; zones: 7 – neck facies; 8 – crater; 9 – volcanoes: 1 – Golubinsky, 2 – Sinkburgrovsky, 3 – Arbalinsky, 4 – Svetloyarsky, 5 – Andra-Atinsky, 6 – Akhtynsky, 7 – Zurmutinsky, 8 – Yuzhno-Chernolessky, 9 – Praskoveysky, 10 – Achikulaksky, 11 – Narimanovsky. 12 – Otkaznensky, 13 – Kalsulinsky, 14 – Tukuisky, 15 – Berezkinsky, 16 – Burunny [Turtukov, 1991], 17 – Pravoberezhny (K. I. Chernenko, N. V. Eremina, V. M. Kharchenko, 2022)

По данным Н. Ф. Фролова, Е. И. Пережогойной, А. С. Горкушина и др. (1971, 1974) для средней части нефтекумской свиты характерно наличие прослоев известняков «рухляков» и пепловых туфов. Прослои пепловых туфов встречаются на Зимне-Ставкинской, Озек-Суатской, Поварковской, Восточной и др. площадях. Причем, на площадях Зимняя Ставка, Пушкарская, Восточная наблюдается хорошая сопоставимость скважин по таким прослоям.

Авторами проведено изучение фондовых материалов с описанием керна нефтекумских отложений Величаевско-Максимокумского вала Восточного Предкав-

казья. В 12 образцах керна, отобранных на 6 площадях в 10 скважинах, содержатся вулканогенно-осадочные породы: туфы, пепловый вулканический материал, туфослюдисто-каолининовая порода, эффузивы. Наиболее интересным представляется керн, отобранный на Правобережной площади в скв. 43рб с глубины 3622-3628 м, представленный эффузивной окремневшей породой, очень крепкой, сильно перемятой, брекчированной (лавобрекчии), с частыми зеркалами скольжения. Ранее на данной площади не фиксировалось наличие палеовулканов [Туртуков, 1991].

Таким образом, на территории Зимне-Ставкинско-Правобережного месторождения зафиксирован еще один вулкан – на площади Правобережная (вулкан 17 на рис. 3).

В результате дешифрирования космических снимков мелкого масштаба Восточного Предкавказья отмечается закономерная приуроченность всего только двух современных геодинамических центров СЦТ (вулканы 7, 12) к вулканоцентрам триасового периода (рис. 4). Подавляющее количество (11 из 17) расположены близко к границе зон сжатия и (или) растяжения, 4 вулкана (13, 14, 15, 17) – непосредственно в зонах сжатия. Это свидетельствует об унаследованности геодинамических условий только некоторых вулканических центров триасового времени, которые имеют особое значение в плане нефтегазоносности, что позволяет констатировать наличие комплекса благоприятных условий для распространения объектов, перспективных на нефть и газ.

В результате интерпретации СЦТ проведено нефтегазогеологическое районирование территории с выделением перспективных площадей и конкретных объектов в плане нефтегазоносности: это в первую очередь геодинамические центры, совпа-



Рис. 4. Схема рудонефтегазогеологического и сейсмического районирования Восточного Предкавказья.

Условные обозначения: 1 – СЦТ (с «георгиевским» крестом – СЦТ более высокой степени достоверности); 2 – зона растяжения; 3 – зона сжатия. Остальные условные обозначения см. на рисунках 2, 3 /

Fig. 4. Scheme of ore-oil-gas-geological and seismic zoning of the Eastern Fore-Caucasus. Legends: 1 – SCT («St. George's» cross – SCT of a higher degree of reliability); 2 – stretching zone; 3 – compression zone. Other symbols see in Fig. 2, 3

дающие с триасовыми вулканическими центрами, суперрезонансные зоны (участки пересечения зон растяжения и сжатия) и зоны субвертикальной деструкции. Кроме того, проведенное исследование с позиций органической теории происхождения УВ, показывает, что площади совместного присутствия массового развития биогермных построек, межрифовых понижений и образования эффузивных пород, а также области мелководного осадконакопления, характеризующиеся массовым развитием водорослевых известняков с периодическим привнесом пирокластического материала можно отнести к перспективным в нефтегазоносном отношении.

Выводы

1. Для эффективных поисков, разведки и доразведки месторождений нефти и газа первостепенное значение имеет выявление закономерностей распространения и образования залежей на конкретной территории Восточного Предкавказья. В условиях дороговизны традиционных методов поисков, разведки и геолого-технологических мероприятий при разработке месторождений нефти и газа для старых нефтегазодобывающих территорий необходимо применение относительно малозатратных способов повышения эффективности геолого-разведочных и геолого-промысловых работ.

2. Для эффективного решения этой сложной задачи использованы известные традиционные и малоизвестные нетрадиционные теоретические основы и методы научных исследований. Применялись известная теория Б. А. Соколова с конкретным ее воплощением в форме «дерева» на основе интерпретаций СЦТ [Корчуганова, Корсаков, 2009], «геосолитонная» теория Р. М. Бембеля [Бембель и др., 2003, 2006] и несколько доработанная и адаптированная для триасового периода теория Ч. Дарвина [Darwin, 1842; Дарвин, 1936] о происхождении и распространении рифогенных построек, приуроченности их к вулканическим центрам.

3. Вулканические постройки являются классическим примером СЦТ и являются корнями нефтегазообразования согласно теории Б. А. Соколова, к которым закономерно приурочиваются рифогенные образования и их нефтегазоносность.

4. При анализе результатов дешифрирования космических снимков мелкого масштаба проведено нефтегазогеологическое районирование территории исследования. Выявлена взаимосвязь современных центров СЦТ и некоторых вулканических построек триасового возраста, что имеет особое значение в плане оценки перспектив нефтегазоносности территории.

5. При анализе палеогеологических и тектонических карт выявляется закономерная связь и приуроченность вулканических построек триасового периода к вероятным глубинным тектоническим нарушениям субширотного и диагонального простирания и к границам различных региональных структур первого порядка.

6. В целом, в триасе выявлена закономерная связь геодинамических условий, вулканов и рифогенных построек, и как следствие, нефтегазоносности рифогенных структур. Эти структуры слагают на Восточном Предкавказье своеобразную карбонатную платформу, подобную известным Астраханской и Тенгизской в Прикаспийской впадине.

Литература

1. Бембель Р. М., Бембель С. Р., Мегеря В. М. Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. – Тюмень: Вектор Бук, 2003. – 224 с.

2. Бембель Р. М., Мегеря В. М., Бембель С. Р. Поиски и разведка месторождений углеводородов на базе геосолитонной концепции дегазации Земли. // Геология нефти и газа. – 2006. – № 2. – С. 2-7.
3. 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). – С. 36-50. DOI: 10.46698/VNC.2021.68.77.003.
4. Винник Л. П., Косарев Г. Л., Макеева Л. И., Орешин С. И. Кавказ и Каспий: топография глубинных сейсмических границ. // Физика Земли. – 2021. – № 4. – С. 47-60. DOI: 10.31857/S0002333721040104
5. Гзовский, М. В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 327 с.
6. Дарвин Ч. Сочинения в 9-ти томах. Т. 2. – М.: Изд. АН СССР, 1936. – С. 277.
7. Егоркин А. В., Золотов Е. Е., Недядько В. В., Ракитов В. А. Региональные особенности глубинного строения Предкавказья по данным профиля МОВЗ Ейск – Ставрополь – Каспийское море. // Геофизика. – 2007. – № 5. – С. 22-25.
8. Корчуганова Н. И., Корсаков А. К. Дистанционные методы геологического картирования: учебник. – М.: КДУ, 2009. – 288 с.
9. Летавин А. И., Орел В. Е., Чернышев С. М. и др. Тектоника и нефтегазоносность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1987. – 94 с.
10. Соколов Б. А., Абля Э. А. Флюидодинамическая модель нефтегазообразования. – М.: ГЕОС, 1999. – 76 с.
11. Туртуков Г. Я. Триасовый вулканизм в Восточном Предкавказье и его влияние на формирование локальных структур. // Геология нефти и газа. – 1991. – д№ 03. – С. 26-28.
12. Харченко В. М., Лапта Д. В. Фракталы в геологии, геотектонические и геодинамические аспекты. // Наука. Инновации. Технологии. – 2021. – № 1. – С. 7-26.
13. Харченко В. М., Лапта Д. В., Неркарарян А. Е. Комплексные дистанционные и геофизические методы поисков залежей углеводородов (территория Центрального Предкавказья). // Наука. Инновации. Технологии. – 2019. – № 4. – С. 33-48.
14. Хасанов М. А., Эзирбаев Т. Б., Эльжаев А. С. Пространственное распространение пермо-триасовых отложений Восточного Предкавказья и их нефтегазоносность. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – № 10 (2). – С. 113-126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008.
15. Cardello G.L., Consorti L., Palladino D.M., Carminati E., Carlini M., Doglioni C. Tectonically controlled carbonate-seated maar-diatreme volcanoes: The case of the Volsci Volcanic Field, central Italy. // Journal of Geodynamics. – 2020. – Vol. 139. – p. 101763. DOI: 10.1016/j.jog.2020.101763
16. Darwin C.R. The structure and distribution of coral reefs. Being the first part of the geology of the voyage of the Beagle, under the command of Capt. Fitzroy, R. N. during the years 1832 to 1836. – London: Smith Elder and Co., 1842. – 16 p.
17. Guang Y., Zhanyin Zh., Mingli Sh. Formation of carbon dioxide and hydrocarbon gas reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin. // PETROL. EXPLOR. DEVELOP. – 2011. – Vol. 38 (1). – pp. 52-58. DOI: 10.1016/S1876-3804 (11) 60014-1
18. Hu T., Chen Zh., Dong Xu., Yao W., Liang Z., Wu K., Guan J., Gao M., Pang Zh., Li Sh., Chen L. Oil origin, charging history and crucial controls in the carboniferous of western Junggar Basin, China: Formation mechanisms for igneous rock reservoirs. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 203. – p. 108600 DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108600
19. Kroeger K.F., Bischoff A., Nicol A. Petroleum systems in a buried stratovolcano: Maturation, migration and leakage. // Marine and Petroleum Geology. – 2022. – Vol. 141. – p. 105682 DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105682
20. Nelepov M., Gridin R., Lutsenko O., Sterlenko Z., Tumanova Ye., Yeriomina N., Chernenko K., Gridin V. Fracture modeling of carbonate reservoirs of Low Triassic Neftekumsk

formation of hydrocarbon field in Petrel software. // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 24. – p. 03020. DOI: 10.1051/e3sconf/202124403020

21. Tikhomirov P.L., Chalot-Prat F., Nazarevich B.P. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. // *Tectonophysics*. – 2004. – Vol. 381. – pp. 119-142. DOI: 10.1016/j.tecto.2003.10.014

22. Wei W., Azmy K., Zhu X. Impact of diagenesis on reservoir quality of the lacustrine mixed carbonate-siliciclastic-volcaniclastic rocks in China. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 233. – p. 105265. DOI: 10.1016/j.jseaes.2022.105265

References

1. Bembel R.M., Bembel S.R., Megerya V.M. Geosolitons: the functional system of the Earth, the concept of exploration and development of hydrocarbon fields. Tyumen. Vector Book, 2003. 224 p. (In Russ.)

2. Bembel R.M., Megerya V.M., and Bembel S.R. Prospecting and exploration of hydrocarbon deposits based on the geosoliton concept of Earth degassing. *Geology of Oil and Gas*. 2006. No. 2. pp. 2-7. (In Russ.)

3. 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). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (2). pp. 36-50. DOI: 10.46698/VNC.2021.68.77.003 (In Russ.)

4. Vinnik L.P., Kosarev G.L., Makeyeva L.I., Oreshin S.I. The Caucasus and the Caspian basin: topography of deep seismic boundaries. *Physics of the Earth*. 2021. No. 4. pp. 47-60 DOI: 10.31857/S0002333721040104 (In Russ.)

5. Gzovsky M.V. Basics of tectonophysics. Moscow. Science, 1975. 327 p.

6. Darwin C. Works in 9 volumes. Moscow. Ed. USSR Academy of Sciences, 1936. pp. 277. (In Russ.)

7. Yegorkin A.V., Zolotov Ye.Ye., Nedyadko V.V., Rakitov V.A. Deep-crust structure of the ciscaucasia region based on the Yeisk – Stavropol – Caspian regional line data using earthquake converted-wave method. *Geophysics*. 2007. No. 5. pp. 22-25. (In Russ.)

8. Korchuganova N.I., Korsakov A.K. Remote methods of geological mapping: textbook. Moscow. KDU, 2009. 288 p. (In Russ.)

9. Letavin A.I., Orel V.E., Chernyshev S.M. Tectonics and oil-and-gas potential of the North Caucasus. Moscow. Science, 1987. 94 p. (In Russ.)

10. Sokolov B.A., Ablya E.A. / Fluidodynamic model of oil and gas formation. Moscow. GEOS, 1999. 76 p. (In Russ.)

11. Turtukov G.Ya. Triassic volcanism in the Eastern Precaucasus and its influence on the formation of local structures. *Geology of Oil and Gas*. 1991. No. 03. pp. 26-28. (In Russ.)

12. Kharchenko V.M. Fractals in geology, geotectonic and geodynamic. *Science. Innovation. Technology*. 2021. No. 1. pp. 7-26. (In Russ.)

13. Kharchenko V.M., Lapta D.V., Nerkararyan A.E. Integrated Remote and Geophysical Methods for Searching Deposits of Hydrocarbons (Territory of the Central Caucasus). *Science. Innovation. Technologies*. 2019. No. 4. pp. 33-48. (In Russ.)

14. Khasanov M.A., Ezirbaev T.B., Eljaeva S. Spatial distribution of Permian-Triassic deposits of the Eastern Ciscaucasia and their oil and gas potential. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10 (2). pp. 113-126. DOI: 10.46698/VNC.2020.17.62.008. (In Russ.)

15. Cardello G.L., Consorti L., Palladino D.M., Carminati E., Carlini M., Doglioni C. Tectonically controlled carbonate-seated maar-diatreme volcanoes: The case of the Volsci Volcanic Field, central Italy. *Journal of Geodynamics*. 2020. Vol. 139. p. 101763. DOI: 10.1016/j.jog.2020.101763

16. Darwin C.R. The structure and distribution of coral reefs. Being the first part of the geology of the voyage of the Beagle, under the command of Capt. Fitzroy, R. N. during the years 1832 to 1836. London: Smith Elder and Co., 1842. 16 p.

17. Guang Y., Zhanyin Zh., Mingli Sh. Formation of carbon dioxide and hydrocarbon gas reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin. PETROL. EXPLOR. DEVELOP. 2011. Vol. 38 (1). pp. 52-58. DOI: 10.1016/S1876-3804 (11) 60014-1

18. Hu T., Chen Zh., Dong Xu., Yao W., Liang Z., Wu K., Guan J., Gao M., Pang Zh., Li Sh., Chen L. Oil origin, charging history and crucial controls in the carboniferous of western Junggar Basin, China: Formation mechanisms for igneous rock reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 203. p. 108600. DOI: 10.1016/j. petrol. 2021.108600

19. Kroeger K.F., Bischoff A., Nicol A. Petroleum systems in a buried stratovolcano: Maturation, migration and leakage. Marine and Petroleum Geology. 2022. Vol. 141. p. 105682 DOI: 10.1016/j. marpetgeo. 2022.105682

20. Nelepov M., Gridin R., Lutsenko O., Sterlenko Z., Tumanova Ye., Yeriomina N., Chernenko K., Gridin V. Fracture modeling of carbonate reservoirs of Low Triassic Neftekumsk formation of hydrocarbon field in Petrel software. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 24. p. 03020. DOI: 10.1051/e3sconf/202124403020

21. Tikhomirov P.L., Chalot-Prat F., Nazarevich B.P. Triassic volcanism in the Eastern Fore-Caucasus: evolution and geodynamic interpretation. Tectonophysics. 2004. Vol. 381. pp. 119-142. DOI: 10.1016/j. tecto. 2003.10.014

22. Wei W., Azmy K., Zhu X. Impact of diagenesis on reservoir quality of the lacustrine mixed carbonate-siliciclastic-volcaniclastic rocks in China. Journal of Asian Earth Sciences. 2022. Vol. 233. p. 105265 DOI: 10.1016/j. jseas. 2022.105265

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 502/504:001.8

DOI: [10.46698/VNC.2022.56.74.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.56.74.010)

Оригинальная статья

Состояние природного равновесия в Алагиро-Садонской агломерации

И. Д. Алборов , О. Г. Бурдзиева 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,
Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 14.07.2022, доработана: 18.08.2022, принята к публикации: 23.08.2022

Резюме: Актуальность работы. Статья посвящена оценке и анализу формирования санитарно-экологического состояния биосферы, находящейся под влиянием горно-перерабатывающей отрасли в условиях высокогорья. **Целью выполненных исследований** является детальное изучение экологоформирующих факторов в зоне деятельности производственно-технической системы с горно-перерабатывающей составляющей и установление приоритетных природно-технических и технологических особенностей в образовании негативных ареалов в экосфере на местности. **Методы работы.** В методическом аспекте, помимо собственных исследований, проанализированы материалы предыдущих научных школ России, специалистов-геоэкологов, работавших в аналогичных природно-климатических и географических условиях, а также опыт продолжительной практической работы рудников Садонского свинцово-цинкового комбината по природоохранной деятельности при добыче и переработке полиметаллических руд, что послужило основой для научного обоснования предлагаемых решений по восстановлению природного равновесия и эффективного функционирования экологической системы. **Результаты работы.** Приведены техногенные и природные факторы, участвующие в процессе происходящих изменений в компонентах природной среды, деформаций ландшафта горного отвода и его фрагментарных нарушений в процессе производственной деятельности. Показаны формы проявления негативных факторов функционирования горно-перерабатывающего производства и сопровождающей его инфраструктуры на развитие приоритетных заболеваний людей в действующих природно-климатических и социально-производственных условиях. Дается потенциальная оценка возможности выращивания агрокультур. Приведены причины деградации и разрушения природного равновесия, источники и объекты негативного влияния при эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Приведена последовательность появления производственных факторов, форма накопления в компонентах окружающей среды, приводящих к нежелательным экстремальным случаям, с развитием пылевых облаков и пылевых бурь в окружающем социально значимом пространстве. Показано взаимодействие и взаимовлияние процессов пылегазовыделения при добыче, транспортировке, дроблении и измельчении руд, а также при переработке на обогатительной фабрике и доставке отходов на места постоянного складирования и хранения. Показано развитие форм заболеваний людей в рассматриваемых условиях. Рассмотрены варианты восстановления природного равновесия в Алагиро-Садонской агломерации и на современном этапе науки и социально-экономического развития туристического рекреационного кластера «Мамисон» в регионе; целесообразно использовать метод ликвидации площадного источника пылевыделения – Унальского хвостохранилища, путем использования биологического метода рекультивации. Отмечается высокая эффективность применяемого метода.

Ключевые слова: месторождение полезных ископаемых, горно-перерабатывающая отрасль, отходы переработки руд, пылевое загрязнение воздуха, негативный фактор загрязнения, техносфера, природное равновесие, заболеваемость, жизнестойкость, хвостохранилище, рекультивация, биологический метод, пылевое облако.

Для цитирования: Алборов И. Д., Бурдзиева О. Г. Состояние природного равновесия в Алагиро-Садонской агломерации. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 146-156. DOI: 10.46698/VNC.2022.56.74.010.

DOI: [10.46698/VNC.2022.56.74.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.56.74.010)

Original paper

State of natural equilibrium in Alagiro-Sadonsky agglomeration

I. D. Alborov , O. G. Burdzieva 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a
Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 14.07.2022, revised: 18.08.2022, accepted: 23.08.2022

Abstract: Relevance. The article is devoted to the assessment and analysis of the formation of the sanitary-ecological state of the biosphere, which is influenced by the mining and processing industry at high altitudes. **Aim.** The aim of the performed research is a detailed study of environmental factors in the area of the production and technical system activity with a mining and processing component, as well as the establishment of priority natural, technical and technological features in the formation of negative areas in the ecosphere. **Methods.** In the methodological aspect, in addition to our own research, we analyzed the materials of previous scientific schools in Russia, geoecologists who worked in similar natural, climatic and geographical conditions, as well as the experience of long-term practical work on environmental protection during the extraction and processing of polymetallic ores of the Sadon lead-zinc plant. This served as the basis for the scientific substantiation of the proposed solutions to restore ecological balance and the effective functioning of the ecological system. **Results.** The article gives technogenic and natural factors involved in the process of ongoing changes in the components of the natural environment, deformations of the landscape of the mining allotment and its fragmentary disturbances during production activities. The forms of manifestation of negative factors in the functioning of the mining and processing industry and accompanying infrastructure on the development of priority diseases of people in the current natural-climatic and social-industrial conditions are shown. A potential assessment of the possibility of crop growing is given. The causes of degradation and destruction of the ecological balance, sources and objects of negative influence during the exploitation of mineral deposits are given. The article shows the sequence of the appearance of production factors, the form of accumulation in the components of the environment, leading to undesirable extreme cases, with the development of dust clouds and dust storms in the socially significant environment. The interaction and mutual influence of dust and gas emission processes during mining, transportation, crushing and grinding of ores, as well as during processing at a concentrating plant and waste transportation to places of permanent burial and storage are shown. The development of forms of human diseases under the considered conditions is shown. The article considers the possibilities for ecological balance restoration in the Alagir-Sadon agglomeration and at the present research stage and socio-economic development of the tourist and recreational cluster "Mamison" in the region; it is advisable to use the method of elimination of the areal source of dust emission (the Unal tailing dump) by using the biological method of reclamation. The applied method has high efficiency.

Keywords: mineral deposit, ore processing industry, ore processing waste, dust pollution, negative factor of pollution, technosphere, natural balance, morbidity, resilience, tailings dump, reclamation, biological method, dust cloud.

For citation: Alborov I. D., Burdzieva O. G. State of natural equilibrium in Alagiro-Sadonsky agglomeration. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 146-156. DOI: 10.46698/VNC.2022.56.74.010.

Введение

Горная индустрия берет свое развитие в недрах Кавказа на территории Республики Северная Осетия-Алания. Первые сведения о серебряных рудах Садона от-

носятся к X веку. В 1768 году русским правительством Садонское месторождение серебряных и свинцовых руд было нанесено на геологическую карту. Оно характеризовалось им как богатое серебряно-свинцовое месторождение, эксплуатация которого весьма целесообразна. Только в 1843 году была организована выплавка серебра и свинца из руд Садонского месторождения со сдачей всей продукции в казну. Таким образом, 1843 год считается годом основания Садонского рудника, как государственного предприятия, положившего начало горнорудной промышленности в Осетии. Большой дефицит свинца для военных нужд Русской империи заставил форсировать работы на Садонском месторождении по промышленному освоению, как самого «благонадежного и богатого» [К 125-тилетию Садонских рудников..., 1968]. С этого времени в Садоне начали проводиться эксплуатационные работы, включающие добычу и переработку полиметаллических руд. Позднее в 1896 г. Садонский рудник был преобразован в Акционерное общество «Алагир», хозяином которого стал Льежский банк, обладающий 80% всех акций. Район деятельности Садонских рудников охватывает участок полиметаллического пояса горной Осетии, ограниченный с запада Кионским перевалом, с востока р. Уналдон. По минеральному составу руды месторождения подразделяются в основном на три типа: пирротино-полиметаллические, кварцево-полиметаллические и колчеданно-полиметаллические. Состав продуктивной ассоциации: кварц, пирит, сфалерит, галенит, пирротин, марказит, халькопирит, блеклая руда, фрейбергит, самородное серебро, сидерит, кальцит. Запасы руд сосредоточены в самом густонаселенном Алагирском ущелье с развитым сельским хозяйством с широкой отраслью горного садоводства.

Многочисленные разведочные штольни, вскрывающие горные выработки, расчистки и траншеи способствовали превращению природного ландшафта в техногенный, происходило усиление экологической напряженности, охватывая все более и более масштабное пространство, достигая равнинной территории.

С непрерывным ростом объемов добычи руды, растут и факторы, негативно влияющие на растительный покров, жизнеспособность организмов и здоровье населения в целом. Как известно, острее это прослеживается в экологических системах с горно-перерабатывающей составляющей, с процессами: добычи металлов; обогащения руд с получением концентрата; транспортировки руды и концентратов до заводов и обогатительных фабрик; доставки горной массы при проходке горных выработок и отходов переработки руд до мест их складирования, хранения и пр. [Максимова, Красавцева, 2020; Красавцева и др., 2021a, б; Голик и др., 2018, 2019; Алборов и др., 2021; Чотчаев и др., 2020; Krasavtseva et al., 2021; Wood, 2003].

Методы и объект исследования

Горные территории имеют вертикальную зональность с характерным ландшафтом, влияющим на качественные параметры биосферы местности. Ландшафт исключительно четко определяет потенциал загрязнения окружающей среды природными и техногенными факторами, поэтому учет приоритетных факторов, приводящих к деформации природной среды, должен находиться в основе методики оценки экологического состояния территории. Задача заключается в том, чтобы раскрыть динамику влияния деятельности горнопромышленных объектов на составляющие природной среды.

В прежние годы на нагорных территориях Осетии проживало более 40% населения, а в настоящее время около 10%. Высокогорные экосистемы (ледники и

вечные снега) всегда были местом формирования источников питьевого водоснабжения, используемых населением равнинных территорий. В то же время, в атласе «Здоровье России» зоны экологического неблагополучия охватывают около 15% территории, где проживает более 60% населения. Это ускоряет течение острых и усиливает процессы формирования хронических болезней. Эксплуатация полиметаллических месторождений в горной зоне Центрального Кавказа связана с выделением в биосферу генетически связанных с месторождением тяжелых и токсичных металлов как в связанном состоянии, так и в свободном. В этих условиях, в группу болезней, связанных с экологией входят болезни органов дыхания, крови, опорно-двигательной, нервной, мочеполовой, сердечнососудистой и эндокринной систем. Широко известны случаи интоксикации населения ртутью, свинцом, кадмием, селеном, мышьяком и т. д. В России загрязнение атмосферного воздуха является причиной примерно 40 тыс. дополнительных смертей и может составлять до 17,5% от общей смертности городского населения. В биосфере протекает человеческая жизнь, поэтому организм находится под непрерывным воздействием литосферы, гидросферы и атмосферы, и любые негативные изменения в этой среде влияют на состояние и жизнедеятельность человека. Атмосферный воздух является наиболее чувствительной субстанцией, влияющей на жизнестойкость и жизнеспособность как людей, так и других организмов. Часть вредных веществ попадает в организм человека напрямую, другая по пищевым цепям: «почва-растение-организм», «почва-растение-организм животного-организм человека» [Голик и др., 2018; Алборов и др., 2021; Wood, 2003; Retiefa et al., 2016; Ngugi et al., 2015].

Вывоз горных пород при ведении горных работ и разгрузка этой массы на дневной поверхности негативно сказывается на составе и свойствах биосферы местности, на животном и растительном мире, вызывает деформацию ландшафта, что приводит к трансформации природной среды в техногенный ландшафт. Все приведенное может спровоцировать возникновение новых, неизвестных ранее заболеваний людей.

Загрязнение атмосферы аэрозолями и газами в горнодобывающих районах и крупных городах высокоразвитых стран существенно повышает смертность населения от заболеваний органов дыхания по сравнению с сельскими районами [Клюев и др., 2020; Максимова и др., 2020; Rocha-Nicoleite et al., 2017]. Пророческими стали слова В. И. Вернадского о том, что хозяйственная деятельность способна изменить мир, поставив его на грань глобальной экологической катастрофы. Ниже в таблице 1 приведены данные, характеризующие состояние смертности по видам заболеваний у людей при загрязнении атмосферного воздуха.

Как радиальные, так и главное Алагирское ущелье охвачены разведочными, подготовительными и проходческими горными работами с вывозом коренных пород и некондиционных руд на дневную поверхность, со свалкой их на берег реки Ардон или же конусовидно сформированных отвалов по склону ущелий от вскрывающих и разведочных штолен. Добытую рудную массу для получения концентрата с рудников доставляют на Мизурскую обогатительную фабрику разными путями (воздушным – канатным подвесными вагонетками и автомобильным транспортом по земле). Рудники (Садон, В. Згид, Архон, Холст, Бурон) добытую руду перевозили с поверхностных бункеров автотранспортом или подвесной канатной дорогой в вагонетках на Мизурскую обогатительную фабрику. Полученный на обогатительном производстве концентрат в металлических стаканах автотранспортом перевозили

Таблица 1 / Table 1

Смертность населения от заболеваний органов дыхания (пневмония, астма, бронхиты, рак легких) вследствие загрязнения атмосферы [Клюев и др., 2020] / Mortality from respiratory diseases (pneumonia, asthma, bronchitis, lung cancer) as consequence of air pollution [Klyuev et al., 2020]

Вид заболеваний / Type of disease	Число смертельных случаев на 100000 человек / Number of deaths per 100000 people			
	в сельской местности / in the countryside	в городах с населением / in cities with population		
		менее 50000 человек / less than 50000 people	от 50000 до 100000 человек / from 50000 to 100000 people	свыше 100000 человек / over 100000 people
Пневмония / Pneumonia	31,6	35,8	39,2	47,9
Бронхиты / Bronchitis	36,9	48,8	53,8	61,4
Прочие заболевания (астма, рак и т. п.) / Other diseases (asthma, cancer etc/)	9,7	10,6	10,7	11,8
Итого / In total	78,2	95,2	103,2	121,3

на завод «Кавцинк» («Электроцинк») в г. Владикавказ. Хвосты обогащения размещались на террасных участках горных рек: ранее в пойме р. Баддон, а затем с 1984 года в пойме р. Ардон, близ с. Унал, а в 20 километрах по прямой расположен рудник Фиагдон со своим горно-обогатительным комплексом на одноименной фабрике с хвостохранилищем в пойменной части правого притока р. Фиагдон, р. Ханикомдон, в пяти километрах от Фиагдонской обогатительной фабрики. Зона деятельности Фиагдонской обогатительной фабрики относится к курортно-рекреационной, с лечебно-оздоровительными, бальнеологическими и спортивно туристическими комплексами. Ландшафт рассматриваемой территории трансформирован и тяготеет к техногенному, фрагментарно находится в соответствии с критериями в критическом состоянии.

Результаты работы и их обсуждение

Анализ состояния здоровья проживающего здесь населения показывает, что его жизнестойкость находится в прямой зависимости от экологических факторов местности (общее почвенное загрязнение, загрязнение почв ртутью, микробиологическое загрязнение почв и др.), связанных с продолжительной деятельностью горно-перерабатывающего и металлургического комплекса.

Особенно остро ощущается влияние Унальского хвостохранилища на почвенный покров и атмосферный воздух [Алборов и др., 2021]. В ветреную погоду уровень загрязнения воздуха в ущелье достигает критических концентраций и превышает ПДК в 10 и более раз. Видимость на государственной автодороге Алагир-Цхинвал не превышает 2-3 м. Картина распространения пылевого облака приведена на рисунке 1.

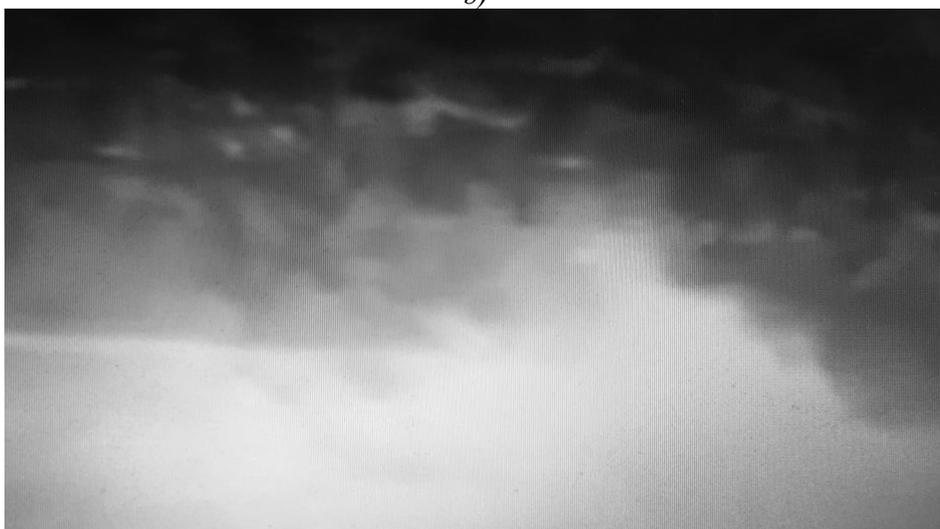
Исследованиями установлено, что в створе господствующего направления ветра (вверх по ущелью) Унальского хвостохранилища, загрязнение почвенного горизонта продолжает расти, и стало влиять на качество биопродукции. Предварительный



a)



b)



c)

Рис. 1. Начало развития запыленности воздуха на Унальском хвостохранилище до рекультивации на уровне 1,5 м от поверхности земли в 10 м от него.

a) скорость ветра 8-10 м/с; b) скорость ветра 12-15 м/с; c) скорость ветра >15 м/с /

Fig. 1. The beginning of the dust content development in the air at the Unal tailing dump before the reclamation at a level of 1.5 m from the ground, 10 m from it. a) wind speed 8-10 m/s; b) wind speed 12-15 m/s; c) wind speed >15 m/s

отбор биопроб во фруктовых плантациях с. Унал показал, что содержание свинца и цинка превышает допустимую концентрацию в 2,0-2,8 раза. Одновременно старожилками замечено снижение жизнестойкости фруктовых деревьев и ухудшение вкусовых качества плодов (яблоки, груши). Это связано с дефляцией тонкодисперсного песка (продукта переработки руды на обогатительной фабрике) и рассеиванием его вокруг источника загрязнения [Максимова, Красавцева, 2020; Тедеева и др., 2018; Алборов, Заалишвили, 2021; Matei, Ungureanu, 2014].

Для оперативного выполнения анализа депонированных хвостов в полевых условиях был использован портативный рентгенофлуоресцентный анализатор Olympus, обеспечивающий быстрый и высокоточный поэлементный анализ. Результаты экспериментов показали высокое содержание вредных и токсичных элементов в %% (рис. 2).

Продолжительное негативное влияние горно-металлургического комплекса в регионе в совокупности с мощным воздействием автотранспортного загрязнения деформируют качество биосферы, (в отдельных зонах до катастрофического уровня), что приводит к превышению показателей экозависимых заболеваний, учитываемых официальными государственными природоохранными органами. Так, например, по данным [Клюев и др., 2020] в 2020 году наиболее высокие значения доли проб почв селитебной зоны, не соответствующих гигиеническим нормативам по содержанию тяжелых металлов, зафиксированы среди регионов России в Республике Северная Осетия-Алания (27,5%), а по содержанию ртути (27,5%).

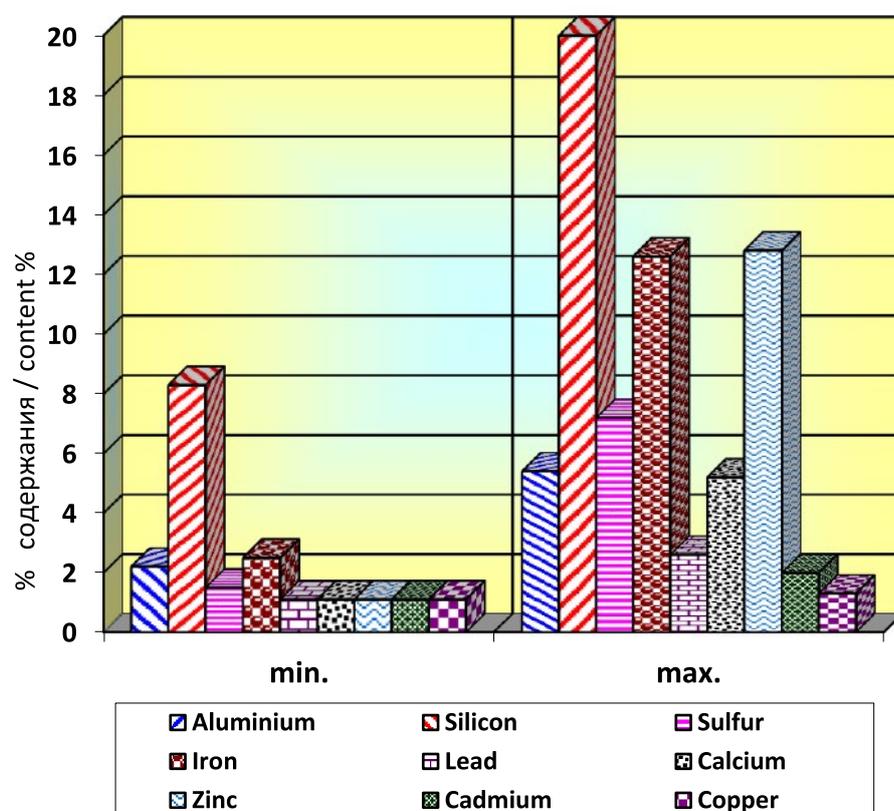


Рис. 2. Содержание вредных и токсичных элементов в депонированных хвостах Унальского хвостохранилища /

Fig. 2. The content of harmful and toxic elements in the deposited tailings of the Unal tailing dump



*Рис. 3. Унальское хвостохранилище после биологической рекультивации /
Fig. 3. The Unal tailing dump after biological reclamation*

Более чем в три раза превышен среднероссийский показатель загрязненности почв химическими веществами на территории детских учреждений и детских площадок в Республике Северная Осетия-Алания (29,79%). С учетом этого реализованы специальные мероприятия по ликвидации последствий нанесенного экологического ущерба от прошлой деятельности горнопромышленной индустрии в регионе.

Для восстановления экологического равновесия на объектах переработки свинцово-цинковых руд в рамках Национального проекта «Экология» в Республике был разработан и реализован проект обеспечения экологической безопасности на объектах накопленного экологического ущерба – Унальского и Фиагдонского хвостохранилищ, путем рекультивации [Петров и др., 2019; Lima et al., 2016; Perti et al., 2013]. После завершения двух этапов рекультивации были проведены полевые исследования по оценке качества атмосферного воздуха в тех же точках мониторинга, что и до рекультивации. Результаты анализа воздушной среды на всех контролируемых точках показали, что в атмосферном воздухе содержание взвешенных веществ ни в одной из анализируемых проб не превысило 0,2 ПДК, включая вещества первого класса опасности. Вид рекультивированной территории приведен на рисунке 3. Первый год содержания восстановленной территорий показал высокую надежность обеспечения экологического благополучия зоны вокруг этого ранее опасного объекта: не было замечено появления пылевых выделений и пылевых бурь в атмосфере, в районе Унальского хвостохранилища, даже при критических скоростях ветра на дневной поверхности.

Выводы и рекомендации

Управление техногенными месторождениями отходов переработки руд цветных металлов в горных ущельях нуждается в специальных мероприятиях по обе-

спечению надежной защиты окружающей среды и населения при возникновении природных, техногенных или природно-техногенных катастроф.

Все техногенные месторождения отходов руд должны иметь декларацию безопасности, утвержденную в соответствии с действующим законодательством.

Собственник объекта техногенного месторождения отходов обязан регистрировать его в органах экологического и технологического надзора, с ведением мониторинга за состоянием окружающей среды и соответствующей отчетностью.

Учитывая высокую насыщенность Алагиро-Садонской агломерации объектами техносферы горно-индустриального производства и высокую изменчивость метеорологических факторов из-за близкого расположения зон с вечными снегами и ледниками, негативно влияющими на свойства биосферы местности, целесообразно установление метеорологического поста в этой зоне. Оперативная метеорологическая информация метеопоста позволит принимать своевременные меры по предотвращению нежелательных поверхностных геодинамических явлений.

Литература

1. Алборов И. Д., Заалишвили В. Б. Влияние ветрового режима и давления атмосферного воздуха на надежность вентиляции рудников и организм человека. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 148-159. DOI: 10.46698/VNC. 2021.17.27.012
2. Алборов И. Д., Бурдзиева О. Г., Тедеева Ф. Г., Алборов С. Т., Алборова Д. И. Воздействие горно-перерабатывающей отрасли на экосферу. // Сборник докладов III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием. – Владикавказ, 2021. – С. 75-81.
3. Голик В. И., Соболев А. А., Дзапаров В. Х., Харебов Г. З. Перспективы разработки месторождений Садона. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. №3. – С. 420-426.
4. 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.
5. 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.
6. Красавцева Е. А., Макаров Д. В., Селиванова Е. А., Икконен П. В., Максимова В. В. Результаты исследований свойств и состава хвостов обогащения лопаритовых руд. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021а. – №3. – С. 190-198.
7. Красавцева Е. А., Максимова В. В., Горбачева Г. Г., Макаров Д. В., Алфертьев Н. Л. Оценка химического загрязнения грунтов и растений в зоне влияния хранилища отходов обогащения лопаритовых руд. // Маркшейдерия и недропользование. – 2021б. – №2 (112). – С. 52-58.
8. К 125-летию Садонских рудников. Вопросы совершенствования горного производства. – Орджоникидзе, 1968. – 229 с.
9. Максимова В. В., Красавцева Е. А. Исследование влияния горнопромышленных отходов на рост и развитие высших растений. // Проблемы региональной экологии. – 2020. – №4. – С. 21-26.
10. Максимова В. В., Красавцева Е. А., Маслобоен В. А. Изучение взаимодействия тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд с водорастворимыми органическими соединениями торфа. // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья: Материалы международной конференции, Апати-

ты. 21-26 сентября 2020 года. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук. – 2020. – С. 318-320.

11. Петров Ю. С., Соколов А. А., Раус Е. В. Математическая модель оценки техногенного ущерба от функционирования горных предприятий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 10. №4. – С. 554-560.

12. Тедеева Ф. Г., Бурдзиева О. Г., Мадаева М. З., Глазов А. П., Зорина Ю. С. Геоэкологические факторы, влияющие на здоровье населения при переработке руд в отрогах гор Северного Кавказа. // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – №3 (207). – С. 12-19.

13. 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.

14. Krasavtseva E., Maksimova V., Makarov D. Conditions Affecting the Release of Heavy and Rare Earth Metals from the Mine Tailings Kola Subarctic. // Toxics. – 2021. – Vol. 9 (7). – p. 163.

15. Lima A. T. et al. The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. // Environmental Science & Policy. – 2016. – Vol. 66. – pp. 227-233.

16. Matei I. V., Ungureanu L. Survey on integrated modelling applied in environmental engineering and management. // Environmental engineering and management journal. – 2014. – Vol. 13 (4). – pp. 1027-1038.

17. Ngugi M. R., Neldner V. J., Doley D., Kusy B., Moore D., Richter C. Soil moisture dynamics and restoration of self-sustaining native vegetation ecosystem on an open-cut coal mine. // Restoration Ecology. – 2015. – Vol. 23 (5). – pp. 615-624. DOI: 10.1111/rec. 1.

18. Perti R., Stein W., Dahmen D., Buschhüt K. Sustainable follow-up use of recultivated surfaces. // World of Mining – Surface & Underground. – 2013. – Vol. 65 (2). – pp. 92-101.

19. Retiefa F., Bondb A., Poped J., Morrison-Saunders A., Kingf N. Global megatrends and their implications for environmental assessment practice. // Environmental Impact Assessment Review. – 2016. Vol. 61. – pp. 52-60.

20. Rocha-Nicoleite E., Overbeck G. E., Müller S. C. Degradation by coalmining should be priority in restoration planning. // Perspectives in ecology and conservation. – 2017. – Vol. 15. No. 3. – pp. 202-205.

21. Wood C. Environmental Impact Assessment: a comparative review, 2nd edition. Essex, UK: Pearson Education Limited, 2003. – p. 230.

References

1. Alborov I. D., Zaalishvili V. B. Influence of wind conditions and pressure the influence of atmospheric air on the reliability of mine ventilation and the human body. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 148-159. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC. 2021.17.27.012.

2. Alborov I. D., Burdzieva O. G., Tedeeva F. G., Alborov S. T., Alborova D. I. The impact of the mining and processing industry on the ecosphere. In: Proceedings of the III All-Russian (national) scient. conf. Vladikavkaz, 2021. pp. 75-81. (In Russ).

3. Golik V. I., Sobolev A. A., Dzaparov V. Kh., Kharebov G. Z. Prospects for the development of Sadon deposits. Sustainable development of mountain territories. 2018. Vol. 10. No. 3. pp. 420-426. (In Russ). DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-420-426

4. 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. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481

5. 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. Vol. 12. No. 2. pp. 283-290. (In Russ). DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290

6. Krasavtseva E. A., Makarov D. V., Selivanova E. A., Ikkonen P. V., Maksimova V. V. Studies of properties and composition of loparite ore mill tailings. *Journal of Mining Science*. 2021a. No. 3. pp. 190-198. (In Russ). DOI: 10.15372/FTPRPI20210318
7. Krasavtseva E. A., Maximova V. V., Gorbacheva G. G., Makarov D. V., Alfertyev N. L. Evaluation of soils and plants chemical pollution within the area affected by storages of loparite ore processing waste. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2021b. No. 2. Issue 112. pp. 52-58. (In Russ).
8. To the 125th anniversary of the Sadon mines. Issues of improving mining production. Ordzhonikidze, 1968. 229 p. (In Russ).
9. Maksimova V. V., Krasavtseva E. A. Study of the mining waste impact on the growth and development of higher plants in the Murmansk region. *Problems of regional ecology*. 2020. No. 4. pp. 21-26. (In Russ). DOI: 10.24411/1728-323X-2020-14021
10. Maksimova V. V., Krasavtseva E. A., Masloboen V. A. Study of the interaction of the fine fraction of the tailings of the enrichment of loparite ores with water-soluble organic compounds of peat. In: *Proceedings of the int. conf. Innov. Proc. of complex proc. of natural and technogenic mineral raw materials*. 2020. pp. 318–320. (In Russ).
11. Petrov Yu. S., Sokolov A. A., Raus E. V. A mathematical model for estimating technogenic losses from the operation of mining enterprises. *Sustainable development of mountain territories*. 2019. Vol. 10. No. 4. pp. 554-560. (In Russ). DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-554-559
12. Tedeeva F. G., Burdzieva O. G., Madaeva M. Z., Glazov A. P., Zorina Yu. S. Geocological factors affecting the health population in the processing of ores in the spurs of the mountains of North Caucasus. *Life Safety*. 2018. No. 3. Issue 207. pp. 12-19. (In Russ).
13. Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Influence of geodynamic processes on the geocological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10 (4). pp. 70-100. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC. 2020.87.26.005.
14. Krasavtseva E., Maksimova V., Makarov D. Conditions Affecting the Release of Heavy and Rare Earth Metals from the Mine Tailings Kola Subarctic. *Toxics*. 2021. Vol. 9. No. 7. p. 163.
15. Lima A. T. Mitchell K., O'Connell D. W., Verhoeven J., Van Cappellen Ph. et al. The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. *Environmental Science & Policy*. 2016. Vol. 66. pp. 227-233.
16. Matei I. V., Ungureanu L. Survey on integrated modelling applied in environmental engineering and management. *Environmental engineering and management journal*. 2014. Vol. 13. pp. 1027-1038. DOI:10.30638/EEMJ. 2014.107
17. Ngugi M. R., Neldner V. J., Doley D., Kusy B., Moore D., Richter C. Soil moisture dynamics and restoration of self-sustaining native vegetation ecosystem on an open-cut coal mine. *Restoration Ecology*. 2015. Vol. 23. pp. 615-624. DOI:10.1111/rec. 12221
18. Perti R., Stein W., Dahmen D., Buschhüt K. Sustainable follow-up use of recultivated surfaces. *World of Mining – Surface & Underground*. 2013. Vol. 65. pp. 92-101.
19. Retiefa F., Bondb A., Poped J., Morrison-Saunders A., Kingf N. Global megatrends and their implications for environmental assessment practice. *Environmental Impact Assessment Review*. 2016. Vol. 61. pp. 52-60.
20. Rocha-Nicoleite E., Overbeck G. E., Müller S. C. Degradation by coalmining should be priority in restoration planning. *Perspectives in ecology and conservation*. 2017. Vol. 15. No. 3. pp. 202-205.
21. Wood C. *Environmental Impact Assessment: a comparative review*, 2nd edition. Essex, UK: Pearson Education Limited, 2003. p. 230.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 591.9

DOI: [10.46698/VNC.2022.95.62.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.95.62.011)

Оригинальная статья

Оценка состояния водоохраных зон Центрального Предкавказья, на примере водных объектов Красногвардейского муниципального округа Ставропольского края при помощи методов дистанционного зондирования Земли

Р. С. Губанов 

Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017,
г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1, e-mail: guevara78@mail

Статья поступила: 13.07.2022, доработана: 17.08.2022, одобрена в печать: 25.08.2022

Резюме: Увеличение сельскохозяйственного производства зачастую связано с вовлечением большим земель в производственный оборот и это обстоятельство однозначно вызывает изменения в естественных природных процессах. Как следствие – формируются искусственные биоценозы, особенность которых, состоит в том, что они не могут существовать без антропогенного вмешательства. К сожалению, нерациональное природопользование приводит к нарушению экологического состояния и негативным последствиям. Такой отрицательный эффект имеет распашка пойменных территорий водных объектов и их водоохраных зон. Животноводство на пойменных территориях, также влечет за собой деградацию растительного покрова водоохраных зон, что может привести к эрозии береговой линии, заилению и изменению морфометрических характеристик береговой линии. Мониторингу водных систем, в связи с увеличивающейся антропогенной нагрузкой в последнее десятилетие уделяется достаточно обширное научное внимание, как в российской научной литературе, так и за рубежом, что подчеркивает **актуальность исследования**. **Целью исследования** является оценка современного экологического состояния прибрежных и водоохраных зон водных объектов на основе данных дистанционного зондирования. **Методы исследования.** Проанализирована модельная территория Ставропольского края (Красногвардейский муниципальный округ). Применение геоинформационных технологий позволило с помощью картографического метода и ретроспективного анализа оценить состояние прибрежных территорий за последние 10 лет. Всего в ходе проведения исследования было выделено 112 нарушений водоохранного законодательства, выраженных в распашке пойм и прибрежных зон водных объектов. Установлена площадь нарушений, которая составляет 96,9 га. **Результаты работы.** Предложенную методику исследования и оценки экологического состояния прибрежных защитных и водоохраных зон можно использовать для других территорий Ставропольского края для более полного исследования состояния прибрежных территорий, а также включения ее в работу контрольно-надзорных органов.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, геоинформационные системы, водоохранная зона, прибрежная защитная полоса, биотоп.

Для цитирования: Губанов Р. С. Оценка состояния водоохраных зон Центрального Предкавказья, на примере водных объектов Красногвардейского муниципального округа Ставропольского края при помощи методов дистанционного зондирования Земли. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 157-169. DOI: [10.46698/VNC.2022.95.62.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.95.62.011).

[DOI: 10.46698/VNC.2022.95.62.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.95.62.011)

Original paper

Assessment of the state of water protection zones of the Central Caucasus, on the example of water bodies of the Krasnogvardeysky Municipal District of the Stavropol Territory using remote sensing methods of the Earth

R. S. Gubanov 

North Caucasian Federal University, 1Pushkin str., Stavropol 355017,
Russian Federation, e-mail: guevara78@mail

Received: 13.07.2022, revised: 17.08.2022, accepted: 25.08.2022

Abstract: The increase in agricultural production is often associated with the involvement of large amounts of land in the production turnover and such factors clearly cause changes in natural processes. This entails the creation of artificial biocenoses, the peculiarity of which is that they cannot exist without anthropogenic intervention. Unfortunately, irrational use of natural resources leads to a violation of the ecological state and negative consequences. Such a negative effect is the plowing of floodplain territories of water bodies and their water protection zones. Animal husbandry in floodplain areas also entails degradation of vegetation cover of water protection zones, which can lead to erosion of the coastline, siltation and changes in morphometric characteristics of the coastline. Monitoring of water systems, due to the increasing anthropogenic load in the last decade, has received quite extensive scientific attention, both in the Russian scientific literature and abroad, which emphasizes **the relevance** of the study. **The aim** of the study is to assess the current ecological state of coastal and water protection zones of water bodies based on remote sensing data. **Methods.** The model territory of the Stavropol Territory (Krasnogvardeysky municipal district) is analyzed. The use of geoinformation technologies made it possible to assess the state of coastal territories over the past 10 years using the cartographic method and retrospective analysis. In total, 112 violations of water protection legislation were identified during the study, expressed in the plowing of floodplains and coastal zones of water bodies. The area of violations, which is 96.9 hectares, has been established. **Results.** The proposed methodology for the study and assessment of the ecological state of coastal protection and water protection zones can be used for other territories of the Stavropol Territory for a more complete study of the state of coastal territories, as well as its inclusion in the work of control and supervisory authorities.

Keywords: remote sensing, geoinformation systems, water protection zone, coastal protective strip, biotope.

For citation: Gubanov R. S. Assessment of the state of water protection zones of the Central Caucasus, on the example of water bodies of the Krasnogvardeysky Municipal District of the Stavropol Territory using remote sensing methods of the Earth. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 157-169. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.62.011.

Введение

Ставропольский край, является ключевой сельскохозяйственной территорией Российской Федерации. Общая площадь земель сельскохозяйственного назначения в Ставропольском крае составляет 6001,5 тыс. га или 90,7% территории,

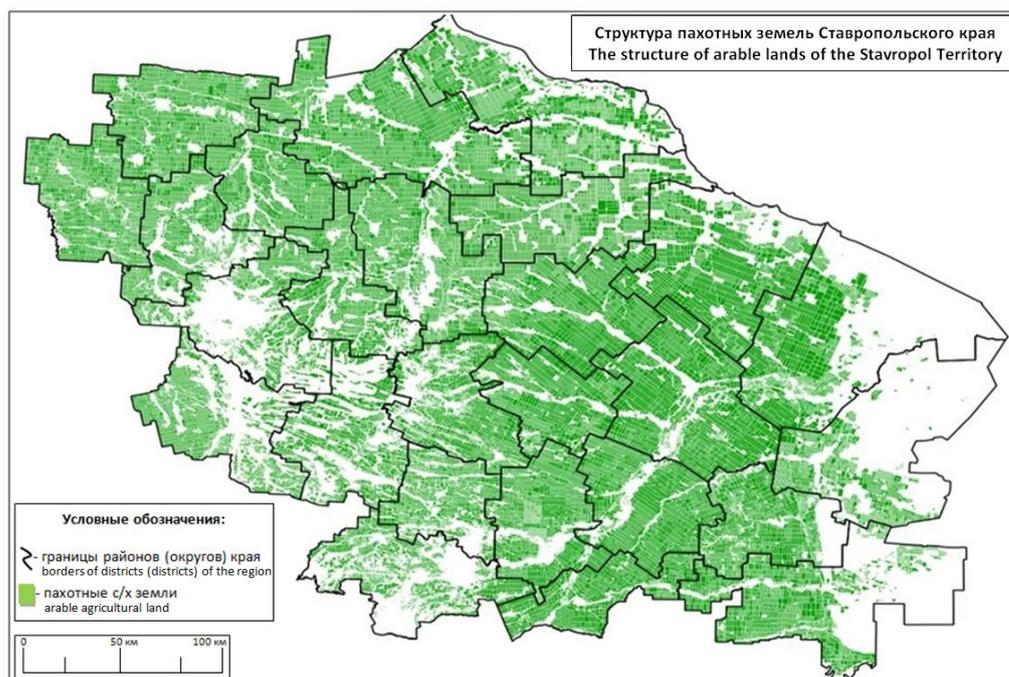


Рис. 1. Структура пахотных земель Ставропольского края /
Fig. 1. The structure of arable lands of the Stavropol Territory

из них сельхозугодья занимают 5791,6 тыс. га или 87,5%, площадь пахотных земель составляет 4002,4 тыс. га или 60,5% территории края [Антонов и др., 2020] (рис. 1).

Ежегодно происходит все большее вовлечение земель в сельскохозяйственный оборот, а именно пастбищные земли переводятся в пахотные, в том числе происходит и распашка прибрежных территорий. Распашка в прибрежных зонах сокращает естественные места обитания позвоночных. Кроме того, учитывая активное применение ядохимикатов, удобрений и пестицидов увеличивается отрицательное влияние хозяйственной деятельности на природную среду водоемов. Сбросы с полей в водные объекты способствуют гибели наземных позвоночных и ихтиофауны. Особое внимание здесь стоит уделить минеральным удобрениям, даже самый незначительный смыв с полей губительно влияет на фаунистические комплексы. В 2018 году, на прибрежных территориях рек Большой и Малый Гок наблюдалась массовая гибель прибрежных наземных позвоночных и рыб. Это было вызвано сбросами с полей ядохимикатов, применяемых сельскохозяйственными производителями. Подобные случаи на территории Ставропольского края фиксируются не редко. Иногда они становятся широко известны и получают широкую огласку через СМИ. Так на Новотроицком водохранилище в 2008 г. погибло около 1000 крякв и около десятка лебедей-шипунув, а в 2018 г. вдоль берега Соленого озера в Александровском районе было обнаружено более 200 мертвых серых журавлей и т.д. [Хохлов и др., 2008].

Таким образом, вовлечение пойменных территорий в сельхозоборот снижает роль пойм, как ландшафтно-геохимического барьера, приводит к загрязнению рек, способствует эрозии почв и ухудшает санитарное состояние прибрежных территорий.

Материалы и методы исследования

Одним из важнейших вопросов современного сельского хозяйства является сохранение качественного состояния земель, дело в том, что 82% сельскохозяйственных угодий, в том числе 55% пашни, подвержено деградационным процессам. Общая площадь эродированных земель в крае составляет 1671 тыс. га, что составляет 31,7% от площади сельскохозяйственных земель. Во многом, ответственность за состояние земель лежит на сельскохозяйственных производителях, чьи действия влекут за собой негативные последствия. К подобным действиям относится и распашка пойменных территорий [Государственный доклад о состоянии окружающей среды].

Данное исследование проведено на региональном уровне, где рассматриваемой территорией представлен Красногвардейский муниципальный округ. Необходимо отметить, что региональный мониторинг является важным элементом геоэкологических, географических, ботанических, зоологических и др. исследований. [Белюченко, 2006; Sedell, Judith, 1984].

В качестве ключевых участков исследования были выделены прибрежные территории водных объектов (общая площадь составляет 1813,60 га), на территории Красногвардейского муниципального округа.

Красногвардейский муниципальный округ (ранее Красногвардейский район) расположен в северо-западной части Ставропольского края и имеет площадь 2236 км². Основу экономики района составляет сельское хозяйство, общая площадь сельскохозяйственных угодий составляет 246,53 тыс. га, из которых 209,6 тыс. га занимает пашня, степень распаханности составляет 92,6% от всей территории [Управление сельского хозяйства].

Речная сеть в Красногвардейском муниципальном округе развита слабо. Наиболее крупная река Егорлык протекает по территории района с юго-востока на северо-запад и впадает в Манычское (Пролетарское) водохранилище, созданное в долине Западного Маныча уже за пределами района.

Егорлык принимает ряд притоков: слева, южнее села Привольного, в него впадает р. Калалы с левым притоком р. Татаркой, в Горькую Балку впадает р. Ладовская Балка, которая является левым притоком Егорлыка. Справа Егорлык принимает притоки Бол. Кугульта, Малый Гок, Большой Гок (рис. 2).

Водный режим Красногвардейского района определяется климатическими, гидрогеологическими, орографическими и гидрографическими особенностями территории.

Водоохранные зоны – это территории, примыкающие к береговой линии, в целях предотвращения загрязнения, засорения, заиления водных объектов и истощения их вод, а также сохранения среды обитания животных. В их границах устанавливается специальный режим осуществления хозяйственной и иной деятельности. Кроме того, в границах водоохраных зон устанавливаются прибрежные защитные полосы, на территориях которых вводятся дополнительные ограничения хозяйственной и иной деятельности.

Ширина водоохранной зоны устанавливается, в зависимости от протяженности реки, так на реках протяженностью менее 10 километров она будет равняться пятидесяти метрам, у рек длиной более десяти и до пятидесяти километров – ста метрам, а на водотоках рек протяженностью более пятидесяти километров она будет равняться двумстам метрам. Размер такой зоны у озер, устанавливается в размере

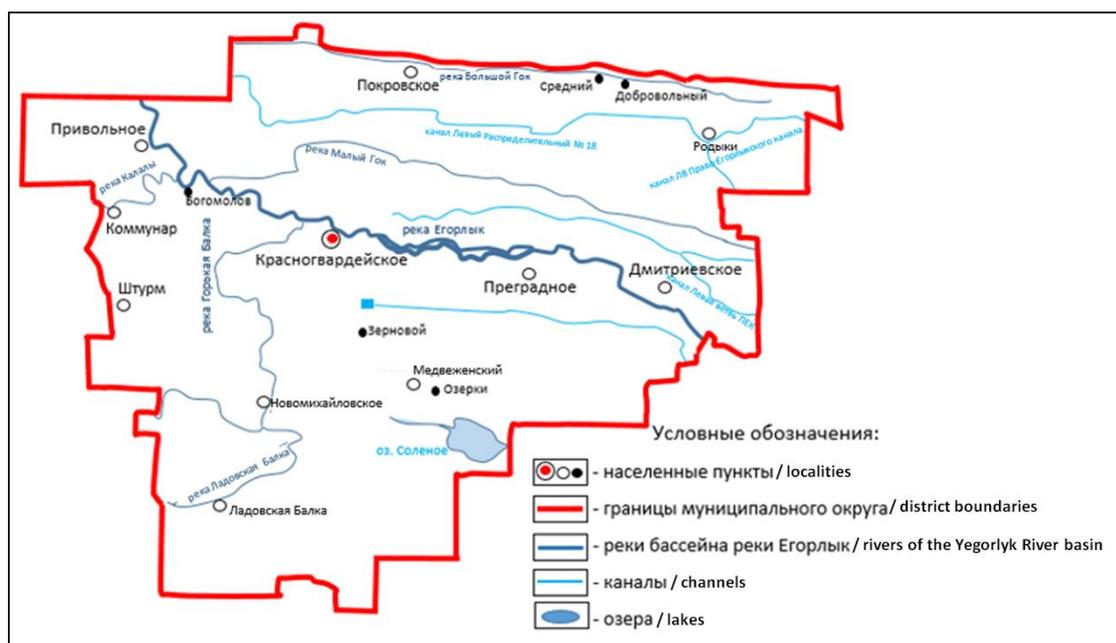


Рис. 2. Водные объекты на территории Красногвардейского муниципального округа /
Fig. 2. Water bodies on the territory of Krasnogvardeysky municipal District

пятидесяти метров, а у водохранилищ, расположенных на водотоках рек, равняется ширине водоохранной зоны водотока.

Ширина прибрежной защитной полосы будет зависеть от уклона берега водного объекта и составляет: тридцать метров для обратного или нулевого уклона, сорок метров для уклона до трех градусов и пятьдесят метров для уклона три и более градуса (Водный кодекс РФ).

Водоохранные зоны рек Красногвардейского района будут составлять: для рек Егорлык, Большой Гок, Малый Гок, Калалы, Горькая Балка двести метров, а для рек Ладовская Балка и Ташла – сто метров. Особая зона у Соленого озера будет равна пятидесяти метрам, однако, данная территория включена в перечень особо охраняемых территорий Ставропольского края, здесь образован государственный природный заказник «Соленое озеро».

Состояние прибрежных защитных и водоохранных зон оценивалось визуально при исследовании территории и с использованием данных дистанционного зондирования [Скрипчинский, 2013; Январев, 2020].

Метод дистанционного зондирования позволяет получить широкий охват территории исследования, без непосредственного физического контакта с объектом исследования. Данный вид исследования зарекомендовал себя, как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях [Ерошенко и др., 2018; Ключко, 2010; Лупян и др., 2009; Родоманская, 2018; Скрипчинский, Антонов, 2019; Труфанова, Сердюкова, 2018; Aiello et al., 2013; Barducci et al., 2009; McFadden et al., 2007].

Для мониторинга береговой линии нами были использованы космические снимки спутника landsat 8, на котором функционирует сервис Google Maps, а также были использованы снимки спутников сверхвысокого разрешения World View Quick Bird. Нами были использованы снимки за 2021, 2014, 2010 годы.

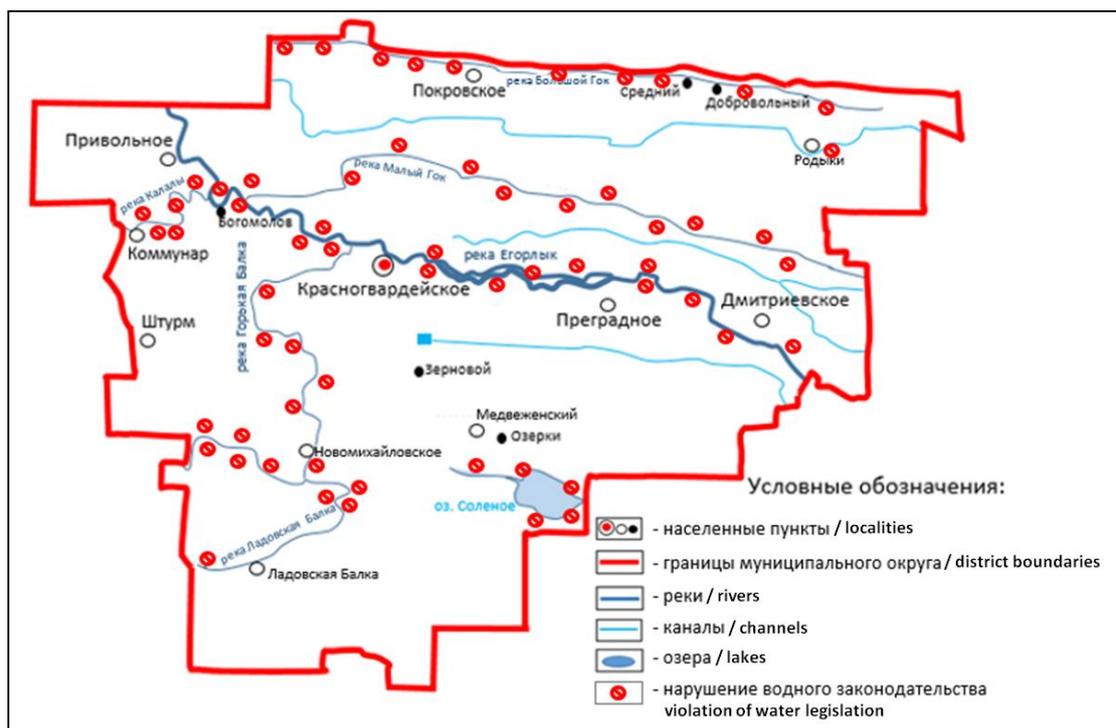


Рис. 3. Схематическая карта нарушений режима водоохранных зон Красногвардейского муниципального округа /

Fig. 3. Schematic map of violations of the regime of water protection zones of the Krasnogvardeysky municipal District

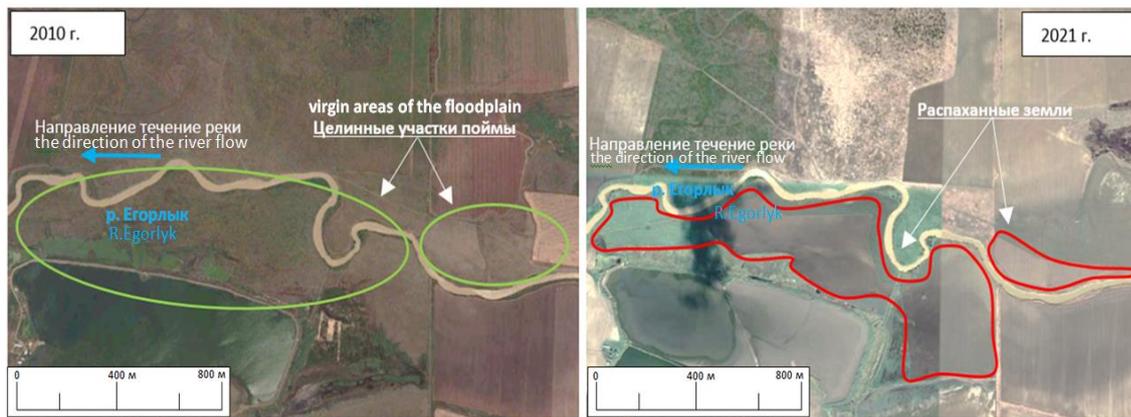
Результаты работы и их обсуждение

При проведении исследований на ключевых участках, было установлено увеличение площадей пашни, на отдельных территориях пахотные угодья граничили с берегами водных объектов на расстоянии не более чем в 7-10 метров. Всего в ходе проведения исследования было выделено 112 нарушений водоохранного законодательства, выраженных в распашке пойм и прибрежных зон водных объектов. Установлена площадь нарушений, которая составляет 96,9 га (рис. 3).

Так, в долине реки Егорлык ретроспективный анализ территории позволяет установить увеличение пашни в водоохранных зонах, за последние десять лет, площадью 61 тыс. м² (рис. 4-5).

Аналогичная ситуация, связанная с нарушением режима водоохранных зон наблюдается на других реках. Так, в долине реки Малый Гок установлено несоблюдение особых условий поймы на площади 121 тыс. м², на реке Большой Гок 226 тыс. м², на реке Горькая Балка 48 тыс. м², в пойме Ладовской Балки 189 тыс. м², Калалы около 170 тыс. м² (рис. 6-8).

Важно отметить, что распашка пойм наносит ущерб плодородию почв, ее поверхностный плодородный слой вымывается и попадает в реку, образуя наносы. Содержание осажденных веществ, образованных вследствие наносов в реках постоянно и зависит от осадков. Наибольшая мутность наблюдается в межсезонный период весной и осенью, когда количество осадков максимально. За исключением реки Егорлык осаднения остаются на дне, и мощность гумусированных отложений рек составляет 30-40 см.



Источник: SAS-planet

Рис. 4. Увеличение площади нарушения режима водоохранной зоны реки Егорлык /
 Fig. 4. Increase in the area of violation of the regime of the water protection zone of the Yegorlyk River



Источник: SAS-planet

Рис. 5. Распашка земель в пойме реки Егорлык /
 Fig. 5. Plowing of lands in the floodplain of the Yegorlyk river



Источник: SAS-planet

Рис. 6. Несоблюдение режима водоохранной зоны реки Большой Гок /
 Fig. 6. Non-compliance with the regime of the water protection zone of the Bolshoy Gok River

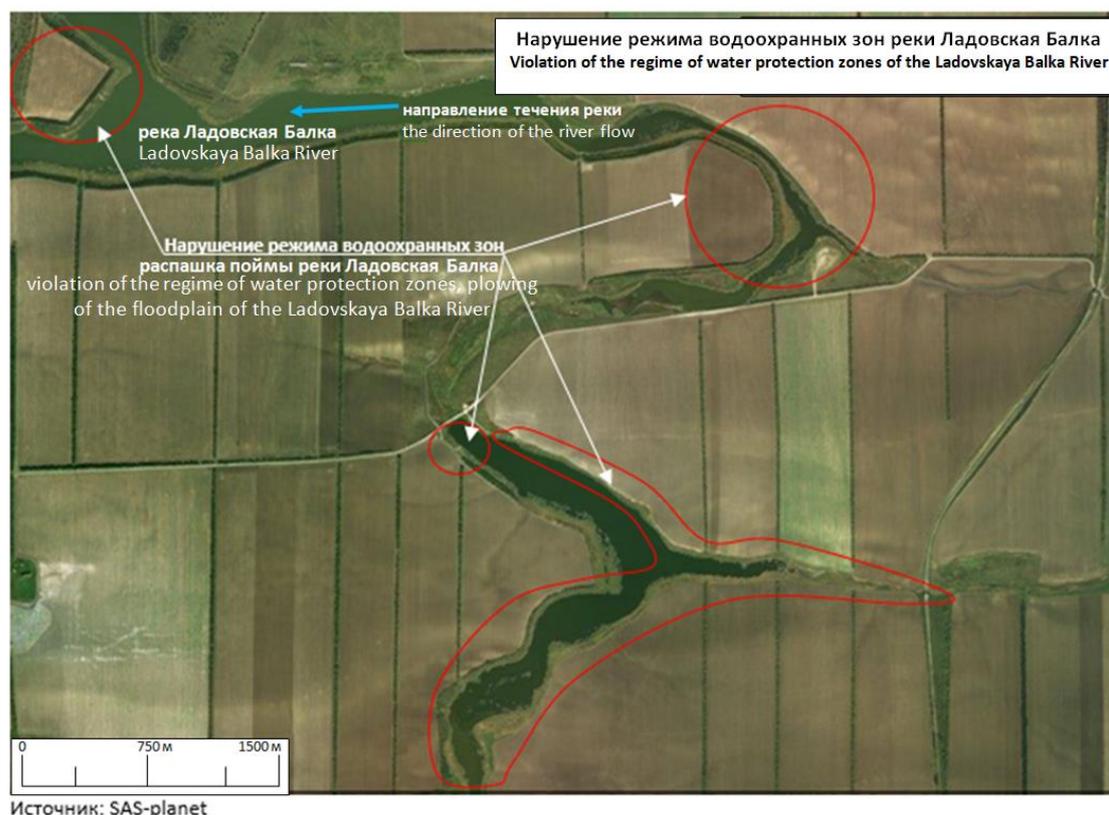


Рис. 7. Несоблюдение режима водоохранной зоны реки Ладовская балка /
Fig. 7. Non-compliance with the regime of the water protection zone of the Ladovskaya Balka river

Мутность реки Егорлык значительно высокая (около 200 г/м^3) и связана она со скоростью течения реки (1,2 м/сек).

Важно отметить, что снижение плодородия компенсируется увеличением объема внесения удобрений, которые также в период дождей попадают в водотоки рек, оказывая негативное влияние на экологическое состояние реки. Более того, период внесения удобрений в почву совпадает с сезоном наибольшего количества атмосферных осадков.

Вопросы качества дренажных вод при сбросе сточных вод и их влияние на микроэлементный состав и общую экологическую составляющую поверхностных водных объектов имеют отражения в научной литературе [Реутова и др., 2021; Сазонова и др., 2022; Shamsollah, 2021, Montgomery, 2007].

Сокращение площадей пойменных лугов влечет за собой трансформацию фаунистического комплекса. Биотоп пойменных лугов сменяется биотопом агроландшафтов. Потеря местообитаний вынуждает животных мигрировать в более доступные места.

Подобное можно наблюдать даже в особо охраняемых зонах, так к примеру, на территории государственного заказника «Соленое озеро» имеется нарушение поймы на площади около 54 тыс. м^2 . Заказник образован с целью сохранения естественного травяного покрова побережья, а также минерального состава воды и грязи озера, однако это не мешает хозяйствующим субъектам производить распашку прибрежной территории озера (рис. 9).

Стоит отметить и то, что специфичность природных условий озера складывает и особый состав орнитофауны. Здесь гнездится шилоклювка (*Recurvirostra avosetta*)

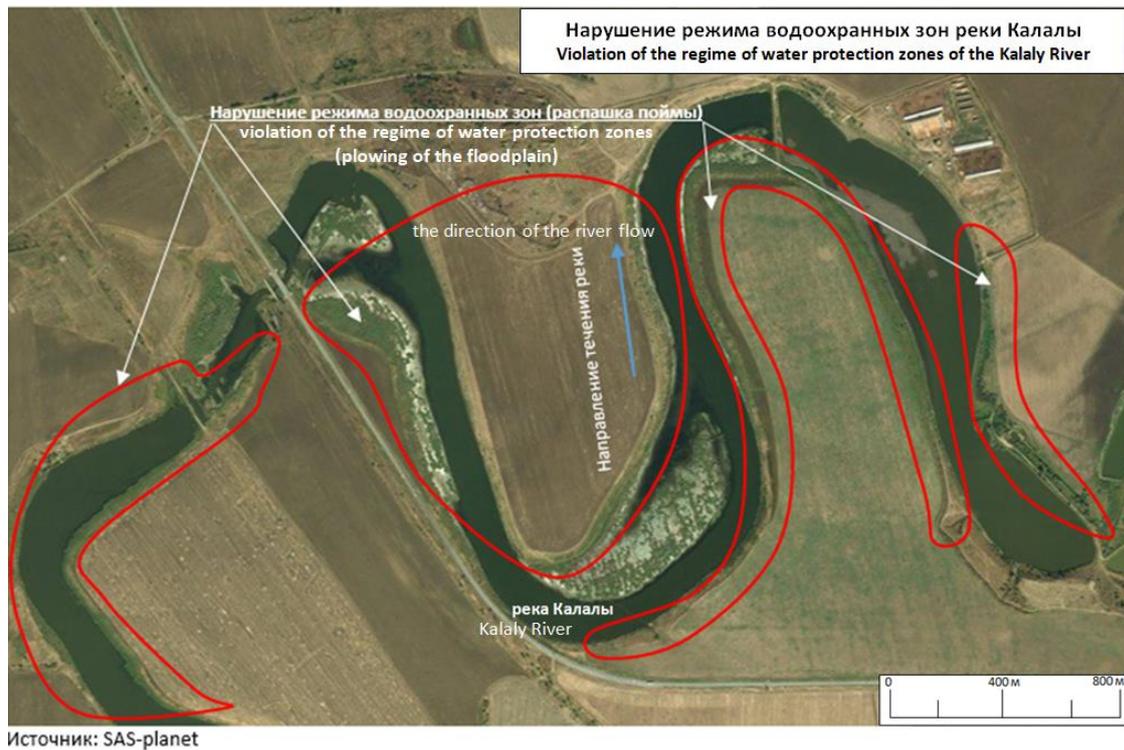


Рис. 8. Несоблюдение режима водоохранной зоны реки Калалы /
 Fig. 8. Non-compliance with the regime of the water protection zone of the Kalala River



Рис. 9. Нарушение режима водоохранной зоны в государственном природном заказнике краевого значения «Соленое озеро» /
 Fig. 9. Violation of the regime of the water protection zone in the state nature reserve of regional significance "Salt Lake"

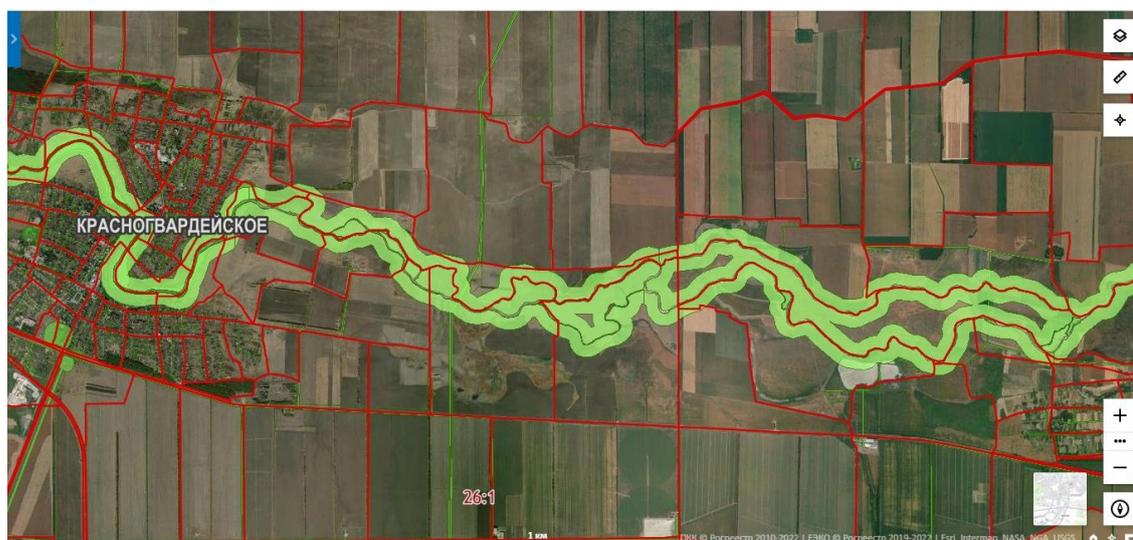


Рис. 10. Отображение водоохранных зон (зеленый цвет) на общедоступном ресурсе «Публичная кадастровая карта» /

Fig. 10. Display of water protection zones on the public resource “Public cadastral map”

и ходулочник (*Himantopus himantopus*), занесенный в Красную книгу Ставропольского края и Красную книгу Российской Федерации.

Основной причиной такого положения дел является несогласованность законодательных актов, в частности Водного и Земельного кодексов, что влечет за собой несоблюдение особого режима при межевании земель. Но, безусловно, самым важным фактором является стремление сельскохозяйственных предприятий к увеличению производства и вовлечению в оборот больших площадей земель.

При таком антропогенном воздействии, единственным способом улучшения экологического состояния водоемов и водотоков является создание лесных защитных полос в прибрежных полосах.

На сегодняшний день, зоны с особыми условиями, к которым относятся и водоохранные, и прибрежные зоны можно установить при помощи общедоступного ресурса «Публичная кадастровая карта» (рис. 10) (<https://pkk.rosreestr.ru>).

Еще одним способом регулирования хозяйственной деятельности в водоохранных зонах является включение в категорию риска водоохранных зон при ведении государственного земельного надзора и надзора за состоянием окружающей среды [Бондарь и др., 2018].

Мониторинг соблюдения режима водоохранных зон с помощью ГИС-технологий и методов дистанционного зондирования Земли может стать наиболее эффективным способом регулирования земельных и водных отношений.

Выводы

Во время исследования, на примере модельной территории Ставропольского края – Красногвардейского муниципального округа было выявлено 112 нарушений режима водоохранных зон. На основе данных дистанционного зондирования, была установлена площадь таких нарушений, в размере 96,9 га. Модельная территория, выбрана, в связи с максимальной вовлеченностью земель в сельскохозяйственное производство. Однако, данная проблематика стоит остро и в ряде других муници-

пальных образований Ставропольского края, и в других субъектах Российской Федерации.

Интенсификация сельского хозяйства влечет за собой вовлечение в оборот все больших площадей земель, в том числе и территорий водоохраных зон. Последствия такого использования земель негативно сказываются на экологическом состоянии водных объектов. Проблема водных ресурсов на юге России стоит достаточно остро, даже, несмотря на масштабное гидротехническое строительство обводнительно-оросительных систем. Особенно остро стоит проблема качества водных ресурсов. Важно отметить негативное влияние сточных вод, сбрасываемых с полей в процессе гидромелиорации земель на прибрежный фаунистический комплекс и ихтиофауну территории. Следовательно, охране водных ресурсов должно быть уделено должное внимание. В данном случае, рассмотрена причина негативного влияния на водные объекты – несоблюдение режима водоохраных зон.

Основной причиной данной проблемы является несогласованность основополагающих нормативно-правовых актов, регулирующих земельные и водные отношения. Такая несогласованность приводит к некорректному межеванию земель, в том числе и в водоохраных зонах.

Выход из подобной ситуации можно найти только на федеральном уровне, путем исправления несоответствий в области регулирования земельных и водных отношений. Кроме того, важно применить рекультивационные мероприятия на землях пойм, используемых в сельскохозяйственном производстве, заключающиеся в приведении данных земель к состоянию, максимально приближенному к естественным фитоценозам пойменных лугов.

Для выявления пойменных территорий и оценки масштаба нарушений, эффективно будет применять технологии дистанционного зондирования Земли. Также данные методы помогут предугадать последствия нарушений водного законодательства. Кроме того, можно отметить, что мониторинг соблюдения режима водоохраных зон с помощью ГИС-технологий и методов дистанционного зондирования Земли, даже при использовании общедоступных сервисов, таких как «Публичная кадастровая карта» может стать наиболее эффективным способом проведения контрольно-надзорных мероприятий исполнительных органов власти.

Литература

1. Антонов С.А., Шестакова Е.О. Пространственный анализ пашни Ставропольского края за период 2015–2019 гг. // Сельскохозяйственный журнал. – 2020. – №3. – С. 6–12.
2. Государственный доклад о состоянии окружающей среды и природопользовании в Ставропольском крае в 2021 году. – Ставрополь: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Ставропольского края. – 2021. – С. 75–77.
3. Белюченко И.С. Региональный мониторинг – научная основа сохранения природы. // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2006. – Т. 2. №1. – С. 25–40.
4. Бондарь Е.В., Скрипчинский А.В., Седых Р.Ю. Разработка методических приемов оценки земельных участков сельскохозяйственного назначения с применением риск-ориентированного подхода на основе геоинформационных систем. // Наука. Инновации. Технологии. – 2018. – №3. – С. 181–194.
5. Ерошенко Ф.В., Лапенко Н.Г., Сторчак И.Г. Использование данных дистанционного зондирования земли для оценки состояния и степени деградации естественных пастбищных угодий. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – №5(73). – С. 14–17.

6. Ключко Т.А. Исследование современного состояния проблем выявления засоленных почв по данным космических съемок. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2010. – Т. 23. №2. – С. 156–166.
7. Лупян Е.А., Барталев С.А., Савин И.Ю. Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России. // *Аэрокосмический курьер*. – 2009. – №6. – С. 47–49.
8. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М. Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2019. – Т. 9. №4. – С. 6–12. DOI: 10.44698/VNC.2021.20.60.014
9. Родоманская С.А. Агроэкологическая оценка деградационных трансформаций сельскохозяйственных земель в контексте обеспечения продовольственной безопасности. // *Международный сельскохозяйственный журнал*. – 2018. – №6. – С. 71–75.
10. Сазонова А.Д., Закруткин В.Е., Решетняк О.С. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 117–130. DOI: 10.44698/VNC.2022.37.47.009.
11. Скрипчинский А.В. Исторический мониторинг водных объектов на основе дистанционного зондирования Земли. // Ученые записки Ставропольского краевого отделения Русского географического общества. – 2013. – Т. 1. – С. 123–129.
12. Скрипчинский А.В., Антонов С.А. Космический мониторинг пастбищ восточных районов Ставропольского края. // *Наука. Инновации. Технологии*. – 2019. – №2. – С. 125–133.
13. Труфанова С.А., Сердюкова А.В. Геоэкологическая оценка состояния пойм малых рек. // *Наука на благо человечества*. – 2018. – С. 95–97.
14. Хохлов А.Н., Фрезе В.В., Ильюх М.П., Друп А.И., Друп В.Д. Применение ядохимикатов в сельском хозяйстве как причина массовой гибели птиц на Ставрополье. // *Кавказ. орнитол. вестн.* – 2008. – №20. – С. 205–207.
15. Январев Г. С. Новейшая структура и геодинамика Западного Предкавказья (на основе дешифрирования космоснимков). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 30–40. DOI: 10.46698/VNC.2020.55.16.002.
16. Aiello A., Canora F., Pasquariello G., Spilotro G. Shoreline variations and coastal dynamics: A space–time data analysis of the Jonian littoral, Italy. // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2013. – Vol. 129. – pp. 124–135.
17. Barducci A., Guzzi D., Marcoiommi P., Pippi I. Aerospace wetland monitoring by hyperspectral imaging sensors: A case study in the coastal zone of San Rossore Natural Park. // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – Vol. 9. – pp. 2278–2286.
18. McFadden L., Nicholls R.J., Vafeidis A., Tol R.S.J. A Methodology for Modeling Coastal Space for Global Assessment. // *Journal of Coastal Research*. – 2007. – No.23. – pp. 911–920.
19. Montgomery D.R. Soil erosion and agricultural sustainability. // *PNAS*. August 14. – 2007. – Vol. 104(33). – pp. 13268–13272.
20. Sedell J., Judith L. Froggatt Importance of streamside forests to large rivers: The isolation of the Willamette River, Oregon, U.S.A., from its floodplain by snagging and streamside forest removal. // *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*. – 1984. – Vol. 22. Issue 3. – pp. 1828–1834.
21. Shamsollah A. Impacts of oak deforestation and rainfed cultivation on soil redistribution processes across hillslopes using 137 Cs techniques. // *Forest Ecosystems*. – 2021. – No. 32. – pp. 1–14.

References

1. Antonov S.A., Shestakova E.O. Spatial analysis of arable land in Stavropol territory during the period from 2015 to 2019. *Agricultural Journal*. 2020. No. 3. pp. 6–12. (In Russ.)

2. National report on the state of the environment and natural management in the Stavropol Territory in 2021. Stavropol. Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Stavropol Territory. 2021. pp. 75-77. (In Russ.)
3. Belyuchenko I.S. Regional monitoring as the scientific basis for nature conservation. The North Caucasus Ecological Herald. 2006. Vol. 2. No. 1. pp. 25-40. (In Russ.)
4. Bondar E.V., Skripchinsky A.V., Sedykh R.Yu. Development of methodological methods for assessing agricultural land plots using a risk-based approach on the basis of geographic information systems. Science. Innovation. Technologies. 2018. No. 3. pp. 181–194. (In Russ.)
5. Eroshenko F.V., Lapenko N.G., Storchak I.G. Use of the data of earth remote sensing for the assessment of the state and degree of degradation of natural pasture lands. Proceedings of the Orenburg State Agrarian University. 2018. No. 5(73). pp. 14-17. (In Russ.)
6. Klochko T.A. Investigation of the current state of the problems of identifying saline soils according to satellite imagery data. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2010. Vol. 23. No. 2. pp. 156–166. (In Russ.)
7. Lupyan E.A., Bartalev S.A., Savin I.Yu. Satellite monitoring technologies in Russian agriculture. Aerospace courier. 2009. No. 6. pp. 47-49. (In Russ.)
8. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11(3). pp. 6–12. DOI: 10.44698/VNC.2021.20.60.014 (In Russ.)
9. Rodomanskaya S.A. Agroecological assessment of degradation transformations of agricultural lands in the context of food security governance. International Agricultural Journal. 2018. No. 6. pp. 71-75. (In Russ.)
10. Sazonov A.D., Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S. Time variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoi Yegoryk River basin under anthropogenic influence and climate change. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12(1). pp. 117–130. DOI: 10.44698/VNC.2022.37.47.009. (In Russ.)
11. Skripchinskiy A.V. Historical monitoring of water bodies based on remote sensing of the Earth. Scientific notes of the Stavropol regional branch of the Russian Geographical Society. 2013. Vol. 1. pp. 123-129. (In Russ.)
12. Skripchinskiy A.V., Antonov S.A. Space monitoring of pastures of the eastern regions of the Stavropol Territory. Science. Innovations. Technologies. 2019. No.2. pp. 125-133. (In Russ.)
13. Trufanova S.A., Serdyukova A.V. Geoecological assessment of the state of floodplains of small rivers. Science, for the Benefit of Mankind. 2018. pp. 95-97. (In Russ.)
14. Khokhlov A.N., Freze V.V., Ilyukh M.P., Drup A.I., Drup V.D. The use of pesticides in agriculture as a cause of mass death of birds in the Stavropol Territory. Caucasian Ornithological Bulletin. 2008. No. 20. pp. 205–207. (In Russ.)
15. Aiello A., Canora F., Pasquariello G., Spilotro G. Shoreline variations and coastal dynamics: A space–time data analysis of the Jonian littoral, Italy. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2013. Vol. 129. pp. 124–135.
16. Barducci A., Guzzi D., Marciommi P., Pippi I. Aerospace wetland monitoring by hyperspectral imaging sensors: A case study in the coastal zone of San Rossore Natural Park. Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 9. pp. 2278–2286.
17. McFadden L., Nicholls R.J., Vafeidis A., Tol R.S.J. A Methodology for Modeling Coastal Space for Global Assessment. Journal of Coastal Research. 2007. No.23. pp. 911–920.
18. Montgomery D.R. Soil erosion and agricultural sustainability. PNAS. August 14. 2007. Vol. 104(33). pp. 13268–13272.
19. Sedell J., Judith L. Froggatt Importance of streamside forests to large rivers: The isolation of the Willamette River, Oregon, U.S.A., from its floodplain by snagging and streamside forest removal. Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen. 1984. Vol. 22. Issue 3. pp. 1828–1834.
20. Shamsollah A. Impacts of oak deforestation and rainfed cultivation on soil redistribution processes across hillslopes using 137 Cs techniques. Forest Ecosystems. 2021. No.32. pp. 1–14.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 911.5.6

DOI: [10.46698/VNC.2022.48.65.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.48.65.012)

Оригинальная статья

Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем

А. Н. Гуня^{1, 2}, У. Т. Гайрабеков^{2, 3}, З. Ш. Гагаева^{2, 3}¹Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29, e-mail: a. n. gunya@igras.ru;²Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, д. 100;³Академия наук Чеченской Республики, Россия, 364024, Чеченская Республика, г. Грозный, бульвар М. Эсамбаева

Статья поступила: 18.07.2022, доработана: 23.08.2022, одобрена к публикации: 30.08.2022

Резюме: Актуальность работы. Различия в динамике углеродного баланса между горными экосистемами высотных поясов и внутри них огромные. Это обусловлено климатом и рельефом с его с высотными, экспозиционными, субстратными и другими различиями. Точечные измерения углеродного баланса нужны в обеспечении репрезентативности экстраполяции измерений. **Целью работы** является выявление ландшафтной структуры на разных уровнях дифференциации для последующей оценки условий баланса углерода. В качестве ключевого участка взяты высокогорные ландшафты на карбоновом трансекте в Чеченской Республике. **Методы работы.** Основными методами послужили полевое ландшафтное картографирование и профилирование. Были применены также результаты классификации ландшафтного покрова по снимку Sentinel-2, которые были проверены в ходе экспедиционных обследований на местности. При этом использовались методы геоинформационного анализа. Расчеты фитомассы проводились на основе полевых замеров с корреляцией по литературным данным. **Результаты работы.** Как показали исследования на профиле и на ключевом участке, на сравнительно небольшом расстоянии условия динамики углерода существенно меняются. Это связано с изменениями условий теплообмена, плодородием почв, экзогенными процессами и антропогенной нагрузкой. Картографирование ландшафтной структуры является важным шагом в определении границ разных условий, определяющих динамику углерода. При этом информативной основой ландшафтного картографирования может выступать схема дешифрирования и классификации снимков высокого разрешения. Контрастность в условиях динамики углерода сохраняется на разных уровнях ландшафтной дифференциации: от регионального к локальному. Наиболее контрастными границами динамики углерода на высокогорном участке карбонового полигона Чеченской Республики выступают ландшафтные границы между типами ландшафтов: горно-луговым, горно-лесным, горно-лесолуговым, горно-луговостепным. В горно-лесных широколиственных лесах содержится больше органического углерода в надземном профиле (более 100 т / га), в то время как в горно-степных и горно-луговых ландшафтах накапливается органический углерод в почвах (десятки т / га). Нарушение естественного покрова приводит к снижению интенсивности баланса углерода.

Ключевые слова: горы, ландшафтная структура, дифференциация, баланс углерода.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова: № FZNU-2021-0011 «Изучение секвестрационного и эмиссионного потенциала карбонового полигона «ЭкоГрозный» и разработка научно-обоснованных технологий декарбонизации (на примере Чеченской Республики)».

Для цитирования: Гуня А.Н., Гайрабеков У.Т., Гагаева З.Ш. Изучение ландшафтной структуры для оценки углеродного баланса горных экосистем. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 170-181. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.65.012.

DOI: [10.46698/VNC.2022.48.65.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.48.65.012)

Original paper

Study of landscape structure to estimate carbon balance of mountain ecosystems

A. N. Gunya ^{1, 2}, U. T. Gairabekov ^{2, 3}, Z. Sh. Gagaeva ^{2, 3}

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetny per., Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: a. n. gunya@igras. ru;

²Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, 100 Kh.A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation;

³Academy of Sciences of the Chechen Republic, 13 M. Esambaev Boulevard, Grozny 364024, Chechen Republic, Russian Federation

Received: 18.07.2022, revised: 23.08.2022, accepted: 30.08.2022

Abstract: Relevance. Differences in the dynamics of the carbon balance between mountain ecosystems of altitudinal belts and within them are enormous. This is due to the climate and topography with its altitudinal, exposure, substrate and other differences. Point measurements of the carbon balance need to ensure that the extrapolation of measurements is representative. **The aim** of the work is to identify the landscape structure at different levels of differentiation for the subsequent assessment of carbon balance conditions. Alpine landscapes on the carbon transect in the Chechen Republic were taken as a key site. **Methods.** Field landscape mapping and profiling served as the main methods. The results of the landscape cover classification based on the Sentinel-2 image, which were verified during field surveys, were also applied. At the same time, methods of geoinformation analysis were used. Phytomass calculations were carried out on the basis of field measurements with correlation according to literature data. **Results.** As studies on the profile and in the key area showed, at a relatively short distance, the conditions of carbon dynamics change significantly. This is due to changes in the conditions of heat and moisture exchange, soil fertility, exogenous processes and anthropogenic load. Mapping landscape structure is an important step in delimiting the different conditions that drive carbon dynamics. At the same time, the scheme for deciphering and classifying high-resolution images can serve as an informative basis for landscape mapping. Contrast under conditions of carbon dynamics persists at different levels of landscape differentiation: from regional to local. The most contrasting boundaries of carbon dynamics in the high-mountain section of the carbon polygon of the Chechen Republic are the landscape boundaries between landscape types: mountain-meadow, mountain-forest, mountain-forest-meadow, mountain-meadow-steppe. Mountain-forest broad-leaved forests contain more organic carbon in the above-ground profile (more than 100 t/ha), while in mountain-steppe and mountain-meadow landscapes organic carbon accumulates in soils (tens of t/ha). Disruption of the natural cover leads to a decrease in the intensity of the carbon balance.

Keywords: mountains, landscape structure, differentiation, carbon balance.

Acknowledgment: *The work was carried out within the framework of the state task of Academician M. D. Millionshchikov GSOTU: No. FZNU-2021-0011 “Study of sequestration and emission potential of the carbon landfill “EcoGrozny” and development of scientifically based decarbonization technologies (on the example of the Chechen Republic)”.*

For citation: Gunya A. N., Gairabekov U. T., Gagaeva Z. Sh. Study of landscape structure to estimate carbon balance of mountain ecosystems. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2022. 12 (3): 170-181. DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.65.012.

Введение

Горные территории занимают более половины площади России. Однако, в современных аналитических обзорах по углеродной тематике горы практически не упоминаются [Кудеяров, 2018; Курбатова, 2020]. Международные исследования динамики карбона в горах опираются в большинстве своем на детальные точечные исследования [Abalogi et al., 2022], реже затрагивают высотные зоны [Garten et al., 2004]. Для оценки баланса углерода в таких сложных регионах, как горы требуются знания об основных границах, характеризующих неоднородность процессов накопления и миграции углерода в пространстве и времени [Гуныя и др., 2021; Гуныя, Гакаев, 2021; Jakšić et al., 2021; Karchegani et al., 2012]. Часто на сложную мозаику экосистемной организации в горах накладывается антропогенная деятельность, еще больше усложняющая картину пространственных вариаций динамики углерода [Amanuel et al., 2018, Ewane, 2020, Joel et al., 2016; Пашкевич и др., 2021; Свалова, 2022].

В начале исследования требуется упорядочить и создать некую упрощенную модель физико-географической дифференциации, отражающую основные типы условий и границы между ними, разделяющие те или иные особенности баланса углерода в экосистемах и ландшафтах. Какие алгоритмы создания таких моделей могут подойти? Развитие методов дистанционного зондирования и получение снимков местности показали, что чрезвычайное разнообразие природы гор сложно типизировать. Имеющиеся классификационные схемы ориентированы в основном на типологию растительного покрова, что отражает лишь одно сезонно-погодное состояние, вовсе не обязательно являющееся репрезентативным для характеристики картографируемых природных систем в целом. Полевое картографирование весьма трудоемко, крупномасштабные карты физико-географической дифференциации имеются лишь на отдельные участки территории, а экстраполяция полученных закономерностей на другие территории требует проверенных алгоритмов. Надежда на геоинформационные методы вполне оправдана, однако получаемый с помощью ГИС массив данных настолько большой, что превышает возможности научных коллективов и опять же ставит задачи по выработке алгоритмов упрощения и упорядочения. Погоня за новыми данными, чему способствует развитие методов ГИС и дистанционного зондирования, получение снимков земной поверхности высокого и сверхвысокого разрешения, принципиально не решает проблему упорядочения данных с дальнейшим выходом на пользователя и решения конкретных задач, связанных с оценкой баланса углерода.

Один их выходов из этого проблемного круга, связанного с накоплением и переработкой большого объема данных, может лежать в использовании ландшафтного подхода, основанного на сочетании точных методов и опыта исследователя в процессе упрощения и упорядочения картины природной дифференциации. Ландшафт представляет собой сложную структурированную и хорошо организованную систему, не сводимую к простому сочетанию компонентов. Ландшафтный подход в изучении горных территорий достаточно хорошо разработан в трудах классиков горного ландшафтоведения (Н. А. Гвоздецкий, Г. П. Миллер, Н. Л. Беручашвили и др.). В основе наиболее известного и детально разработанного инструмента картографирования горных ландшафтов лежали представления о типологическом понимании природных комплексов Н. А. Гвоздецкого.

Под ландшафтной дифференциацией следует понимать, с одной стороны, процесс выделения и упорядочения природных комплексов разного ранга и типа, а, с

другой, зафиксированный в определенный момент времени результат природной дифференциации, предполагающий пространственную визуализацию выявленных природных структур. Ландшафтное картографирование как один из основных методов упорядочения природных комплексов, включает саму идентификацию природных комплексов, выявление пространственной организации и иерархии. Часто исследователь останавливается на каком-то одном варианте ландшафтной дифференциации, соответствующем задачам исследования. Нередко существуют мнения о том, что, сколько исследователей, столько вариантов ландшафтной карты. Представляется, что различия могут быть, однако главные структуры и границы будут похожими у разных исследователей. В горах к таким, более или менее однозначно выделяемым границам, относятся высотно-зональные границы.

Ландшафтная структура – отражение сложного сочетания разных факторов. Ландшафтный выдел характеризует пространство жизнедеятельности определенного типа и ранга. Иерархия факторов отражает разную «силу» природных границ. Не существует единой иерархии – она может различаться для разных регионов и даже местностей. Ландшафтную организацию выявляют, как правило, на основе опыта полевого исследования. Выявление ландшафтной дифференциации позволяет сравнить уровни природной иерархии с масштабами человеческих действий.

Целью работы является выявление ландшафтной структуры на разных уровнях дифференциации для последующей оценки условий баланса углерода. В качестве ключевого участка взяты высокогорные ландшафты на карбоновом трансекте в Чеченской Республике.

Методы исследований

В основу работы положены исследования ландшафтной дифференциации по профилю, соединяющему несколько участков на карбоновом полигоне Чеченской Республики [Гуния и др., 2021; Керимов и др., 2021]. Более подробно изучена ландшафтная дифференциация на высокогорном – Галанчожском участке. Для этого были применены результаты классификации ландшафтного покрова по снимку

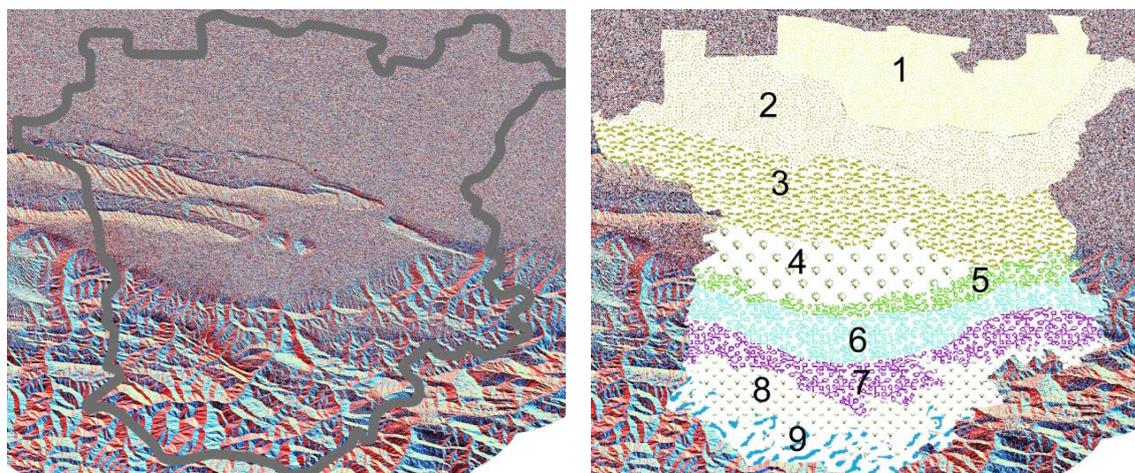


Рис. 1. Рельеф (справа) и высотно-зональные типы ландшафтов (слева) территории Чеченской Республики (см. легенду в таблице 1) /

Fig. 1. Relief (on the right) and altitudinal-zonal types of landscapes (on the left) of the territory of the Chechen Republic (see the legend in Table 1)

Таблица 1 / Table 1

**Потенциальные запасы углерода в пределах ландшафтных высотных зон /
Potential carbon stocks within landscape altitudinal zones**

Ландшафтные высотные зоны / Landscape altitudinal zones	Номер на карте (рис. 1) / Number on the map (Fig. 1)	Потенциальное накопление углерода в тоннах на гектар: I – менее 10, II – 10-100, III – более 100 / Potential carbon accumulation in tons per hectare: I – less than 10, II – 10-100, III – more than 100
Равнинная сухостепная с фрагментами полупустынь / Plain dry steppe with fragments of semi-deserts	1	I
Равнинная степная кустарниковая с фрагментами луго- и лесостепей / Plain steppe shrubland with fragments of meadow and forest steppes	2	II
Предгорно- и низкогорно-лесостепная с массивами степей и мелколесья / Foothill and low-mountain forest-steppe with massifs of steppes and low forests	3	II
Предгорная лесостепная окультуренная / Foothill forest-steppe cultivated	4	II
Предгорно- и низкогорно-лесная широколиственная, местами лесостепная / Foothill and low mountain forest broad-leaved, in some places forest-steppe	5	III
Низкогорно- и среднегорно-лесная преимущественно широколиственная, местами смешанных лесов / Low-mountain and mid-mountain forest predominantly broad-leaved, in some places mixed forests	6	III
Высокогорно-лесная преимущественно мелколиственная, местами хвойно-мелколиственных лесов и лесолуговых участков / Alpine-forest predominantly small-leaved, in some places coniferous-small-leaved forests and forest-meadow areas	7	II
Высокогорно-луговая / Alpine meadow	8	II
Высокогорные пустоши, местами с субнивальными лужайками / High mountain barren, in places with subnival lawns	9	I

Sentinel-2 от 15 августа 2019 г., которые были проверены в ходе экспедиционных обследований на местности. При этом использовались методы геоинформационного анализа, которые зарекомендовали себя при оценке динамики углерода (например, [Kurz et al., 2009; Malysheva et al., 2017; Schepaschenko et al., 2015]). Расчеты фитомассы проводились на основе полевых замеров с корреляцией по литературным данным, в частности, по известной работе Базилевич Н. И. [1993].

Результаты работы и их обсуждение

Территория Чеченской Республики характеризуется контрастными границами ландшафтов как на зональном уровне, так и на локальном (рис. 1). Девять основных высотно-зональных типов ландшафтов отражают большие различия в потенциальном накоплении углерода, выраженном в количестве фитомассы в тоннах на гектар (табл. 1). Но еще большие различия наблюдаются внутри самих зон, которые могут достигать десятков раз. Это связано со сложной природной дифференциацией, когда на небольших пространствах ландшафтные комплексы с маломощным почвенным покровом и скудной растительностью (или, порой, без нее) чередуются с ландшафтами с хорошо развитым почвенно-растительным покровом.

Наибольшие вариации фитомассы наблюдаются в ландшафтных зонах: степной кустарниковой с фрагментами луго- и лесостепей, лесостепной окультуренной, предгорно- и низкогорно-лесной широколиственной, а также предгорной и низкогорно-лесной широколиственной.

Физико-географический профиль через западную часть территории Чеченской Республики протягивается до 70 км (прямая линия) и имеет перепады высот от 200 до 2100 м над уровнем моря (рис. 2). Важнейшими факторами ландшафтной дифференциации на региональном уровне являются геологическое строение, рельеф и климат. Как видно из профиля, наиболее древними породами являются юрские отложения.

В самой южной среднегорно-высокогорной части профиля преобладают нижнеюрские аргиллиты, близкие по своему составу к глинам. Поэтому они часто служат водупором, способствуя развитию оползневых процессов и соответствующих форм рельефа. Галанчожский участок приурочен к зоне разлома: относительно пологий склон западной и северо-западной экспозиции резко обрывается к руслу небольшого ручья в ущелье, которое служит границей среднеюрских алевролитов. Они являются плодородным субстратом для горно-луговостепных почв, которые служили основой для формирования террасового земледелия. Далее к северу распространены среднеюрские породы, они чередуются с верхнеюрскими, переходящими в нижнемеловые породы, представленные известковистыми породами (мел, мергель). Здесь развиты карбонатные почвы, карст, отчасти также гипсовый карст. Следующие ниже низкогорья сложены палеоген-неогеновыми майкопскими глинами, которые сменяются четвертичными отложениями из галечников, песков и глин, слагающих Чеченскую равнину. Северные части профиля представлены передовыми хребтами – Сунженским, Грозненским и Терским, сложенными преимущественно неогеновыми отложениями из песчаников и глин, переходящими в понижения между хребтов (Андреевская и Алханчуртская долины) в четвертичные отложения из галечников, песков и глин.

Большие перепады высот создали разнообразие климатических условий. Следует отметить, что обеспеченность данными о климате в горной части весьма скудная. Считается, что при подъеме на каждые 100 м температура воздуха падает в среднем на $0,5^{\circ}$. Зимой понижение меньше (около $0,3^{\circ}$), а летом больше – $0,6^{\circ}$. По мере увеличения высоты местности количество осадков растет (от 300 мм на равнине за Терским хребтом до 1400-1700 мм на северных склонах Черных гор и Пастбищного хр.). В Галанчожской межгорной котловине (рис. 3) количество осадков уменьшается до 600-700 мм.

Горный рельеф сильно дифференцирует условия тепло- и влагообеспеченности. Даже на коротких расстояниях обеспеченность теплом и влагой может ва-

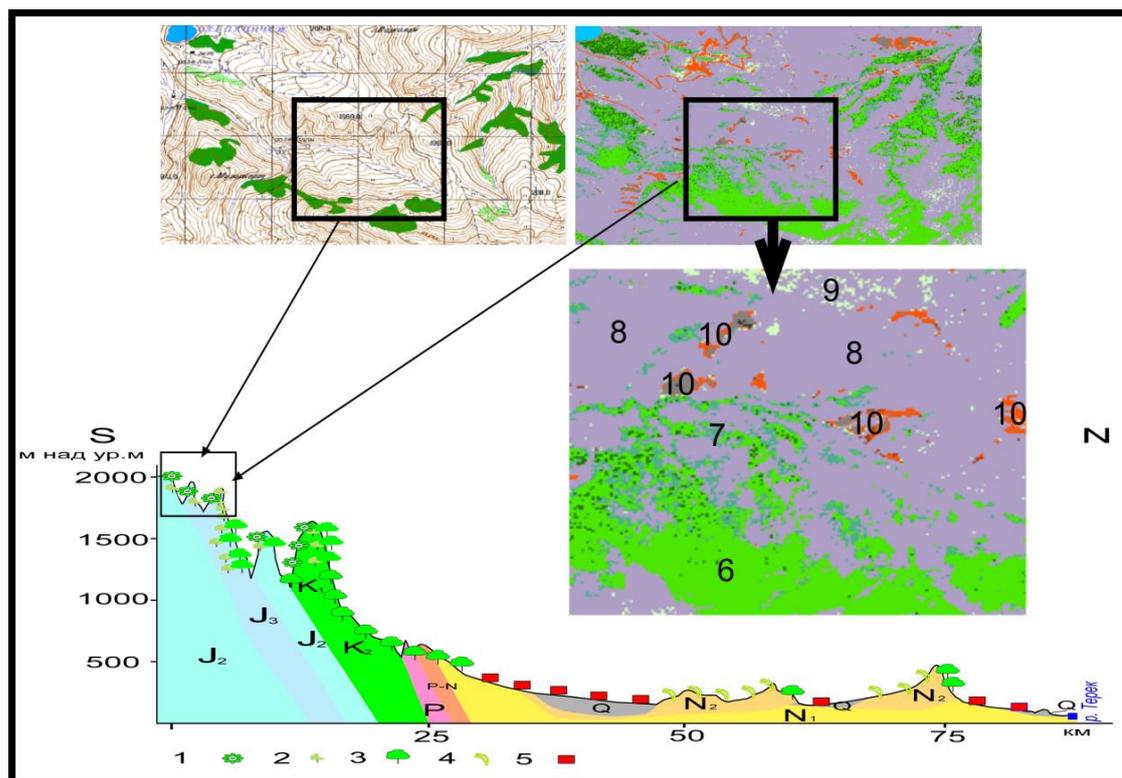


Рис. 2. Ландшафтная структура на профиле (внизу) и на Галанчоожском высокогорном участке. Цифрами на профиле показаны доминирующие ландшафты: 1 – горно-лесолуговые; 2 – горно-лесные мелколесные; 3 – горно-лесные широколиственные; 4 – горно-степные; 5 – селитебные территории и пашни. Цифрами на снимке показаны ландшафты: 6 – горно-лесные мелколиственные, 7 – горно-лесолуговые, 8 – горно-лугостепные, 9 – горно-луговые субальпийские, 10 – эрозионно-денудационные, часто с оголенными коренными породами / Fig. 2. Landscape structure on the profile (below) and in the Galanchozh high-mountain area. The numbers on the profile show the dominant landscapes: 1 – mountain-forest-meadow; 2 – mountain-forest small forest; 3 – mountain-forest broad-leaved; 4 – mountain-steppe; 5 – residential areas and arable land. The numbers on the image show landscapes: 6 – mountain-forest small-leaved, 7 – mountain-forest-meadow, 8 – mountain-meadow-steppe, 9 – mountain-meadow subalpine, 10 – erosion-denudation, often with bare bedrock.

рывать на 20-30%, что сразу заметно, например, по распространению леса. На низких высотах лес тяготеет к склонам северной экспозиции, а также к ложбинам стока (Терский и Сунженский хребты). В высокогорье – максимальная высота распространения леса приурочена к склонам южной экспозиции. Широколиственные леса из ясеня, дуба, липы, бука, граба преобладают до высоты 1000-1200 м, далее к ним примешиваются мелколиственные породы (береза). Начиная с высоты около 1500 м, леса не образуют сплошной полосы. В результате хозяйственной деятельности высотная зона от 1300-1500 до 1800 м преобразована человеком. Здесь лесная зона фрагментарна, она чередуется с лесолугостепными и лесолуговыми участками. Выше 2000 м начинается горно-луговая зона. Степные участки занимают склоны южной экспозиции передовых хребтов. На равнинах степные ландшафты трансформированы хозяйственной деятельностью и превращены в селитебные земли и сельскохозяйственные поля.

Галанчоожский участок занимает среднегорно-высокогорную зону республики в пределах абсолютных высот около 1600-1900 м. Участок представляет собой поло-

гий склон, сложенный среднеюрскими алевролитами. Доминантными природными комплексами выступают террасовидные поверхности с разнотравно-вейниковыми (из вейника тростниковидного) с пятнами рододендрона желтого (азалии) горными лугостепями на мощных горно-луговостепных черноземовидных почвах. Субдоминантными комплексами выступают лесолуговые комплексы из ивы и березы, на гребневых участках – разнотравно-дерновинно-злаковые сообщества, которые сменяются по понижениям пятнами азалии.

Как показывают результаты ландшафтного профилирования и дешифрирования снимков, условия для динамики углерода резко различаются на достаточно небольших расстояниях. Ландшафтный профиль представляет собой модель, отражающую контрастные границы и условия баланса углерода. Предгорные и равнинные участки депонируют углерод в подземной части. Определенную долю привносят извлекаемые и нередко оставляемые на поверхности продукты нефтегазового комплекса. Горные и высокогорные участки, напротив, депонируют большую часть углерода в наземной части – в основном в древесной растительности (более 50 т на га.). Сезонная и межгодовая динамика баланса углерода значительно более активная в низко- и среднегорье, где распространены горно-луговостепные, горно-лесолуговые и горно-лесные широколиственные ландшафты.

Переходя на локальный уровень ландшафтной дифференциации (Галанчожский участок), следует заметить, что контрастность условий углеродного баланса



Рис. 3. Ландшафты высокогорного участка карбонового полигона Чеченской Республики. В центре оз. Галанчож /
Fig. 3. Landscapes of the high-mountainous area of the carboniferous polygon of the Chechen Republic. In the center of the lake Galanchozh

не уменьшается. Здесь появляются эрозионно-денудационные участки, свободные от почв и растительности. Они представляют собой, по сути, выведенные из баланса углерода территории. При этом они могут соседствовать с участками, где происходит активное накопление углерода в виде торфянистых почв под зарослями азалии, мощного дерновинно-злакового покрова в субальпийских лугах и др. Все это определяет большое разнообразие типов баланса углерода. Задача исследователя состоит при этом в выборе эффективных алгоритмов генерализации данных для больших территорий. В рамках ландшафтоведения принято считать, что ландшафт определенного ранга является целостной единицей. При таком мнении, высотная ландшафтная зона, как бы она не была внутренне мозаична, выступает определенным типом баланса углерода.

Выводы

Одной из важнейших особенностей процесса накопления углерода является пространственно-временная дифференциация условий накопления в зависимости от ландшафтов и их использования. Различия в запасах и динамике углерода в тех ландшафтах были проанализированы на ландшафтном профиле и на фрагменте от дешифрированного космического снимка. Было обнаружено, что контрастность в условиях динамики углерода сохраняется на разных уровнях ландшафтной дифференциации: от регионального к локальному. В горно-лесных широколиственных лесах содержится больше органического углерода в надземном профиле (более 100 т / га), в то время как в горно-степных и горно-луговых ландшафтах накапливается органический углерод в почвах (десятки т / га). Нарушение естественного покрова приводит к снижению интенсивности баланса углерода. Это в целом согласуется с другими экспериментальными данными (например, [Hilton, West, 2020; Mugagga et al., 2015; Sleeter et al., 2015; Zheng et al., 2019]). Крайне высокая дифференциация условий динамики углерода в горах затрудняет оценку его баланса. В этом случае ландшафтная структура может послужить той основой, которая обеспечит репрезентативность интерполяции точечных данных.

Литература

1. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М.: Наука, 1993. – 293 с.
2. Гуня А. Н., Гакаев Р. А. Ландшафтная структура как основа для оценки динамики углерода в горах (на примере Макажойской котловины). // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XI. / Под ред. И. А. Керимова, В. А. Широковой, В. Б. Заалишвили, В. И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2021. – С. 332-339.
3. Гуня А. Н., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш., Алахвердиев Ф. Д. Комплексный подход к оценке изменений в землепользовании и их влияния на динамику углерода в горных ландшафтах Чеченской Республики. // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2021. – Т. 15. №4. – С. 39-52. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52
4. Керимов И. А., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. №3 (25). – С. 35-47.
5. Кудеяров В. Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор). // Почвоведение. – 2018. – №6. – С. 643-658.

6. Курбатова А.И. Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотических составляющих углеродного цикла. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2020. – Т. 28. №4. – С. 428-438. DOI: [10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438](https://doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438).
7. Пашкевич М.А., Коротаяева А.Э. Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 170-182. DOI: [10.46698/VNC.2021.87.18.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.87.18.014).
8. Свалова В.Б. Управление геэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (1). – С. 129-147. DOI: [10.46698/VNC.2022.48.61.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.48.61.010).
9. Abalori T.A., Cao W., Weobong C.A.-A., Wang S., Anning D.K., Sam F.E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China. // Chilean Journal of Agricultural Research. – 2022. – Vol. 82 (1). – pp. 52-64. DOI: [10.4067/s0718-58392022000100052](https://doi.org/10.4067/s0718-58392022000100052)
10. Amanuel W., Yimer F., Karlton, E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. // Journal of Ecology and Environment. – 2018. – Vol. 42 (1). – pp. 1-11.
11. Ewane E.B. Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192 (8). – pp. 1-35.
12. Garten C.J. Soil carbon dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. – 2004. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57407.pdf>
13. Hilton R. G., West A. J. Mountains, erosion and the carbon cycle. // Nature Reviews Earth and Environment. – 2020. – No. 1. – pp. 284-299. DOI: [10.1038/s43017-020-0058-6](https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6).
14. Jakšić S., Ninkov J., Milić S., Vasin J., Živanov M., Jakšić D., Komlen V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13 (15). – p. 8332. DOI: [10.3390/su13158332](https://doi.org/10.3390/su13158332).
15. Joel L.M., Balthazar M.M., Didas N.K., John B.H., Proches M., Loth S.H., Jozef M., Hubert D. Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. // Journal of Soil Science and Environmental Management. – 2016. – Vol. 7 (9). – pp. 123-132. DOI: [10.5897/JSSEM2016.0557](https://doi.org/10.5897/JSSEM2016.0557)
16. Karchegani P.M., Ayoubi S., Mosaddeghi M.R., Honarjoo N. Soil organic carbon pools in particle-size fractions as affected by slope gradient and land use change in hilly regions, western Iran. // Journal of Mountain Science. – 2012. – Vol. 9 (1). – pp. 87-95. DOI: [10.1007/s11629-012-2211-2](https://doi.org/10.1007/s11629-012-2211-2)
17. Kurz W.A., Dymond C.C., White T.M., Stinson G., Shaw C.H., Rampley G.J., Smith C., Simpson B.N., Nielson E.T., Trofimow J.A., Metsaranta J., Apps M.J. CMS-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards // Ecological Modelling. – 2009. – Vol. 220. – pp. 480-504. DOI: [10.111016/j.ecolmodel.2008.10.018](https://doi.org/10.111016/j.ecolmodel.2008.10.018)
18. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. // InterCarto. InterGIS. – 2017. – Vol. 23. – pp. 373-382. DOI: [10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382](https://doi.org/10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382)
19. Mugagga F., Nagasha B., Barasa B., Buyinza M. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. // International Journal of Regional Development. – 2015. – Vol. 2. No. 1. – pp. 58-75.
20. Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Yu., Ontikov P.V., Schepaschenko M.V., Kraxner F. Estimation of Forest Area and its Dynamics in Russia Based on Synthesis of Remote Sensing Products. // Contemporary Problems of Ecology. – 2015. – Vol. 8. No. 7. DOI: [10.1134/S1995425515070136](https://doi.org/10.1134/S1995425515070136).
21. Sleeter B.M., Liu J., Daniel C., Frid L., Zhu Zh. An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics:

a case study in the Sierra Nevada Mountains of California. // *AIMS Environmental Science*. – 2015. – Vol. 2 (3). – pp. 577-606. DOI: [10.3934/environsci.2015.3.577](https://doi.org/10.3934/environsci.2015.3.577).

22. Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. No. 8. – p. 708. DOI: [10.3390/f10080708](https://doi.org/10.3390/f10080708)

References

1. Bazilevich N.I. Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia. – Moscow. Nauka. 1993. 293 p. (In Russ.)
2. Gunya A.N., Gakaev R.A. Landscape structure as a basis for assessing the dynamics of carbon in the mountains (by the example of the Makazhoy Depression). *Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus*. Vol. 11. Edited by I.A. Kerimov V.A. Shirokova, V.B. Zaalishvili, V.I. Cherkashin. Moscow. S.I. Vavilov Institute for the History of Natural Science and Technology, RAN, 2021. pp. 332-339. (In Russ.)
3. Gunya A.N., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh., Alakhverdiev F.D. An integrated approach to the assessment of the changes in land use and their impact on carbon dynamics in the mountain landscapes of the Chechen Republic. *Proceedings of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 2021. Vol. 15. No. 4. pp. 39-52. DOI: [10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52](https://doi.org/10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52) (In Russ.)
4. Kerimov I.A., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carboniferous polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2021. Vol. 6. No. 3 (25). pp. 35-47. (In Russ.)
5. Kudyarov V.N. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink on the territory of Russia (analytical review). *Soil science*. 2018. No. 6. pp. 643-658. (In Russ.)
6. Kurbatova A.I. Analytical review of modern research on changes in the biotic components of the carbon cycle. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and Life Safety*. 2020. Vol. 28. No. 4. pp. 428-438. DOI: [10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438](https://doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438). (In Russ.)
7. Pashkevich M.A., Korotaeva A.E. Analysis of biological methods for quarry wastewater treatment from nitrogen compounds. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (4). pp. 170-182. DOI: [10.46698/VNC.2021.87.18.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.87.18.014). (In Russ.)
8. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (1). pp. 129-147. DOI: [10.46698/VNC.2022.48.61.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.48.61.010). (In Russ.)
9. Abalori T.A., Cao W., Weobong C.A.-A., Wang S., Anning D.K., Sam F.E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2022. Vol. 82 (1). pp. 52-64. DOI: [10.4067/s0718-58392022000100052](https://doi.org/10.4067/s0718-58392022000100052)
10. Amanuel W., Yimer F., Karlton, E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*. 2018. Vol. 42 (1). pp. 1-11.
11. Ewane E.B. Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192 (8). pp. 1-35.
12. Garten C.J. Soil carbon dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. 2004.
13. Hilton R.G., West A.J. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2020. No. 1. pp. 284-299. DOI: [10.1038/s43017-020-0058-6](https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6).
14. Jakšić S., Ninkov J., Milić S., Vasin J., Živanov M., Jakšić D., Komlen V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (15). p. 8332. DOI: [10.3390/su13158332](https://doi.org/10.3390/su13158332).

15. Joel L. M., Balthazar M. M., Didas N. K., John B. H., Proches M., Loth S. H., Jozef M., Hubert D. Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2016. Vol. 7 (9). pp. 123-132. DOI: [10.5897/JSSEM2016.0557](https://doi.org/10.5897/JSSEM2016.0557)
16. Karchegani P. M., Ayoubi S., Mosaddeghi M. R., Honarjoo N. Soil organic carbon pools in particle-size fractions as affected by slope gradient and land use change in hilly regions, western Iran. *Journal of Mountain Science*. 2012. Vol. 9 (1). pp. 87-95. DOI: [10.1007/s11629-012-2211-2](https://doi.org/10.1007/s11629-012-2211-2)
17. Kurz W. A., Dymond C. C., White T. M., Stinson G., Shaw C. H., Rampley G. J., Smith C., Simpson B. N., Nielson E. T., Trofimow J. A., Metsaranta J., Apps M. J. CMS-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*. 2009. Vol. 220. pp. 480-504. DOI: [10.111016/j. ecolmodel. 2008.10.018](https://doi.org/10.111016/j. ecolmodel. 2008.10.018)
18. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. *InterCarto. InterGIS*. 2017. Vol. 23. pp. 373-382. DOI: [10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382](https://doi.org/10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382)
19. Mugagga F., Nagasha B., Barasa B., Buyinza M. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. *International Journal of Regional Development*. 2015. Vol. 2. No. 1. pp. 58-75.
20. Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Lesiv M. Yu., Ontikov P. V., Schepaschenko M. V., Kraxner F. Estimation of Forest Area and its Dynamics in Russia Based on Synthesis of Remote Sensing Products. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. Vol. 8. No. 7. DOI: [10.1134/S1995425515070136](https://doi.org/10.1134/S1995425515070136).
21. Sleeter B. M., Liu J., Daniel C., Frid L., Zhu Zh. An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics: a case study in the Sierra Nevada Mountains of California. *AIMS Environmental Science*. 2015. Vol. 2 (3). pp. 577-606. DOI: [10.3934/environsci. 2015.3.577](https://doi.org/10.3934/environsci. 2015.3.577).
22. Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. *Forests*. 2019. Vol. 10. No. 8. p. 708. DOI: [10.3390/f10080708](https://doi.org/10.3390/f10080708)

УДК 504.064.36: 504.064.37

DOI: [10.46698/VNC.2022.58.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.33.001)

Оригинальная статья

Использование мультиспектральной съемки при наблюдении за состоянием лесного покрова Земли

И. А. Керимов ^{1, 2}, Т. Б. Эзирбаев ¹

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М. Д. Миллионщикова, Россия, 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х. А. Исаева, д. 100;

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, Большая Грузинская ул., 10, e-mail: kerimov@ifz.ru

Статья поступила: 28.07.2022, доработана: 21.08.2022, одобрена в печать: 05.09.2022

Резюме: Актуальность работы. Мировое сообщество ученых связывает рост средней температуры на Земле и глобального потепления климата с ростом концентрации углекислого CO₂, метана CH₄ и других парниковых газов в атмосфере. Наибольшее влияние среди парниковых газов играет CO₂. Россия как страна, ратифицировавшая Киотский протокол призвана контролировать уровень эмиссии углекислого газа в атмосферу. Общеизвестно что концентрация CO₂ в атмосфере растет не только за счет сжигания ископаемого топлива. Ощутимый вклад в процесс накопления вносит нарушение поглощения углерода зеленой растительностью, в частности лесами. **Цель работы.** Аналитический обзор наиболее известных отечественных и зарубежных технологий, методик и методов мультиспектральной съемки по материалам из открытых источников и публикаций зарубежных и отечественных исследователей с целью обоснования применимости и актуальности данного метода при исследовании и мониторинге углеродного баланса на территории Российской Федерации и в частности карбонового полигона Чеченской Республики. **Методы исследования.** Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных различными датчиками (например, лидарами, мультиспектральными, гиперспектральными датчиками и/или камерами), дает возможность довольно детально и продуктивно проводить мониторинг и даже «увидеть» отдельные деревья в лесу. Отдельные кроны деревьев служат «блоками» для создания точной целостной картины состояния леса, поскольку эти знания позволяют пользователям анализировать, моделировать и управлять состоянием леса на уровне отдельных деревьев путем сопоставления нескольких источников данных (например, данных дистанционного зондирования и полевых исследований). **Результаты исследования.** В статье приводится обзор зарубежных и отечественных источников о применении мультиспектральных датчиков и камер, лидарных камер, подвешенных к БПЛА для мониторинга состояния лесных массивов, с целью изучения углеродного баланса на предгорных и горных лесистых территориях. Обоснована применимость и актуальность данного метода при исследовании и мониторинге поглощения углекислого газа территориями покрытыми лесами.

Ключевые слова: Мультиспектральная съемка, таксация, карбон, углекислый газ, поглощение, углеродный баланс.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № ФЗНУ-2021-0012 «Комплексная интерпретация геофизических и геоэкологических данных для изучения баланса парниковых газов».

Для цитирования: Керимов И. А., Эзирбаев Т. Б. Использование мультиспектральной съемки при наблюдении за состоянием лесного покрова Земли. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 182-194. DOI: [10.46698/VNC.2022.58.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.33.001).

DOI: [10.46698/VNC.2022.58.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.33.001)

Original paper

Experiences in the application of multispectral imagery in land cover observation

I. A. Kerimov^{1, 2}, T. B. Ezirbaev²

¹Grozny State Oil Technical University named after Academician M. D. Millionshchikov, 100Kh. A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation;

²Institute of Physics of the Earth RAS, 10/1 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123995, Russian Federation, e-mail: kerimov@ifz.ru

Received: 28.07.2022, revised: 21.08.2022, accepted: 05.09.2022

Abstract: Relevance. The global scientific community links the rise in the Earth's average temperature and global climate warming to the rising concentrations of CO₂, CH₄ methane and other greenhouse gases in the atmosphere. CO₂ plays the greatest influence among greenhouse gases. Russia as a country that ratified the Kyoto Protocol is required to control the level of atmospheric carbon dioxide emissions. It is widely known that the concentration of CO₂ in the atmosphere is increasing not only through the burning of fossil fuels. A tangible contribution to the accumulation process is made by disturbances in carbon sequestration by green vegetation, in particular forests. **Aim.** Analytical review of the most known domestic and foreign technologies, methods and techniques of multispectral imagery based on open sources and publications of foreign and domestic researchers in order to justify the applicability and relevance of this method to study and monitor the hydrocarbon balance in the territory of the Russian Federation and in particular the carbonic range of the Chechen Republic. **Methods.** The use of unmanned aerial vehicles (UAV) equipped with various sensors (e. g. lidars, multispectral, hyperspectral sensors and/or cameras) enables quite detailed and productive monitoring and even "seeing" individual trees in the forest. Individual tree crowns serve as 'building blocks' to create an accurate holistic picture of forest health, as this knowledge allows users to analyses, model and manage forest health at the individual tree level by correlating several data sources (e. g. remote sensing and field data). **Results.** The paper gives a review of foreign and domestic sources on the application of multispectral sensors and cameras, lidar suspended from UAVs to monitor the state of forests, to study the hydrocarbon balance in foothills and mountainous forested areas. The applicability and relevance of this method in the study and monitoring of carbon dioxide absorption in areas covered by forests is justified.

Keywords: Multispectral survey, inventory, Carbon dioxide, absorption, hydrocarbon balance.

Acknowledgements: *The work was performed within the state task № FZNU-2021-0012 «Comprehensive interpretation of geophysical and geoecological data for studying the balance of greenhouse gases».*

For citation: Kerimov I. A., Ezirbaev T. B. Experiences in the application of multispectral imagery in land cover observation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 182-194. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.33.001.

Введение

По данным ученых Института космических исследований (ИКИ) РАН экосистемы российских лесов за год поглощают почти 300 млн тонн углерода. Ранее официальные цифры были на уровне 160-180 млн тонн в год (https://mostpp.ru/guilds_news/vozmozhnosti-distantcionnogo-zondirovaniya-zemli/).

Такая разница в результатах исследований зависит от интерпретации данных, для которой нужна актуальная информация о фактическом состоянии лесов. Офи-

циальная оценка основывается на документах государственного лесного реестра 25-тилетней давности.

Исходя из вышесказанного, чтобы получить приближенные к истине данные о стоке парниковых газов в России необходимо организовать постоянный мониторинг территорий с использованием беспилотных летательных аппаратов. Такой подход в комплексе с другими данными позволит получать точные и актуальные данные о реальном положении дел в реперных точках и на их основе проводить дешифровку снимков, полученных со спутника [Филипчук и др., 2020; Эльсункаева, Эзирбаев, 2020].

Для реализации рекомендаций Киотского протокола РКИК ООН (https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml) по ограничению выбросов в атмосферу «парниковых» газов необходима технология установления наиболее значимых источников – стоков (поглощения) CO_2 , CH_4 и др. газов. Такая технология может быть основана на использовании мультиспектральных съемок с БПЛА в мониторинговом режиме и наземного инструментального определения потоков этих газов в разных ландшафтно-климатических зонах и для различных видов растительности. Учитывая ослабевающую адсорбцию CO_2 тропическими лесами, особое внимание следует уделить бореальным и смешанным лесам Евразии, которые должны стать основным фактором смягчения последствий изменения климата [Лялько и др., 2005; Яицкая, Бригида, 2022]

Мультиспектральная съемка использует данные на определенных длинах волн в электромагнитном спектре, включая невидимый спектр. Поскольку разные типы земного покрова отражаются в разной степени с разной частотой, этот метод особенно полезен для сбора данных об изменении лесного покрова земной поверхности. Изменение лесного покрова может влиять на глобальное потепление, поэтому мониторинг изменений является важной мерой предосторожности. Операторы могут обрабатывать мультиспектральные данные и создавать ортофотопланы и трехмерные модели с высокой точностью привязки к местности без необходимости закладывать и координировать наземные опорные точки.

Мультиспектральная визуализация изначально была разработана для получения изображений из космоса, но, установка этих систем на БПЛА, позволила извлечь выгоду из ряда уникальных решений, которые предлагает этот метод [Свалова и др., 2019].

Мультиспектральная съемка применима для решения широкого спектра задач, включая мониторинг и классификацию лесного покрова, а также для определения геолого-геофизических характеристик исследуемой территории в связке с геофизическими информационными системами [Керимов и др., 2019]. Использование БПЛА имеет более низкие эксплуатационные расходы, меньшее время повтора (например, в случаях, когда погода не позволяет получить снимки оптимального качества) и отсутствие избыточности данных.

Методы исследования

Для обследования полей и лесов в нашем случае применяются дроны, оборудованные мультиспектральными камерами. Этот способ исследования позволяет оперативно собирать большой объем информации на довольно обширных территориях о свете, поглощенном растениями/деревьями и отраженном от них. На основе полученных данных можно делать вывод о породах, классификации и состоянии посадок.

Мультиспектральные камеры, установленные на БПЛА, обеспечивают инновационный подход к ведению мониторинга общего состояния лесного хозяйства, а также точечного обследования.

Главное преимущество мультиспектрального сенсора – точная фиксация цвета, отражаемого растениями. Мультиспектральная камера производит съёмку в следующих диапазонах: красный край – в этом канале, находящемся на границе инфракрасного излучения, наиболее заметен пигмент хлорофилл, при участии которого происходит фотосинтез; ближний инфракрасный – используется для аналогичных целей и расположен на границе видимого света и среднего инфракрасного излучения; зелёный – для визуализации вегетативной активности растений и процесса их старения, важен при созревании и подготовке к сбору сельскохозяйственных культур; красный – в аграрном секторе имеет первостепенное значение для анализа качества и состояния почвы, также позволяет визуализировать на мультиспектральном снимке рукотворные объекты; синий – служит для отображения на снимках воды, а также для изучения дна водоёмов, и наконец видимое излучение: съёмка стандартных RGB-фотографий.

Применение GPS модуля в составе оборудования БПЛА повышает точность съёмки, дает информацию о высоте, положении и скорости движения камеры в режиме реального времени [Токарева, 2010].

Результаты работы и их обсуждение

В своем исследовании Benjamin T. Fraser и Russell G. Congalton сравнили визуальную интерпретацию с цифровой обработкой мультиспектральных снимков девяти лесных участков, расположенных на юго-востоке Нью-Гэмпшира, общей площадью 605,15 га засаженных деревьями различных пород, классов сукцессии лесов с результатами наземного анализа по идентификации отдельных деревьев. Эти участки были выбраны из-за наличия на них данных полевой инвентаризации (например, участков непрерывной инвентаризации лесов).

Для этого исследования использовались три метода классификации: Classification and Regression Trees (CART), random forests (случайные леса) и support vector machine (SVM).

В своих исследованиях для классификации отдельных видов деревьев они сопоставляют мультиспектральные, разновременные данные, лидарные или гиперспектральные данные.

Полученные результаты показали, что эффективность машинной обработки снимков высокого разрешения превосходит обычное дешифрирование для специфического (+ 7,44%) и обобщенного (+ 16,04%) видового состава леса (рис. 1). Эти результаты указывают на то, что автоматизированные подходы обработки могут служить альтернативой для обследования лесов в местном масштабе, а применение мультиспектральных изображений или более продвинутых методов сегментации, еще больше увеличит значимость данного вида исследований [Benjamin et al, 2021].

Группой ученых из Италии в работе «Improving Tree Species Classification Using UAS Multispectral Images and Texture Measures» (Классификация пород деревьев с помощью мультиспектральной съёмки с БПЛА и метода текстур) приводятся результаты проведения мультиспектральной съёмки питомника растений в местечке Чиримидо, Комо, Италия, который был примечателен для ученых наличием разных

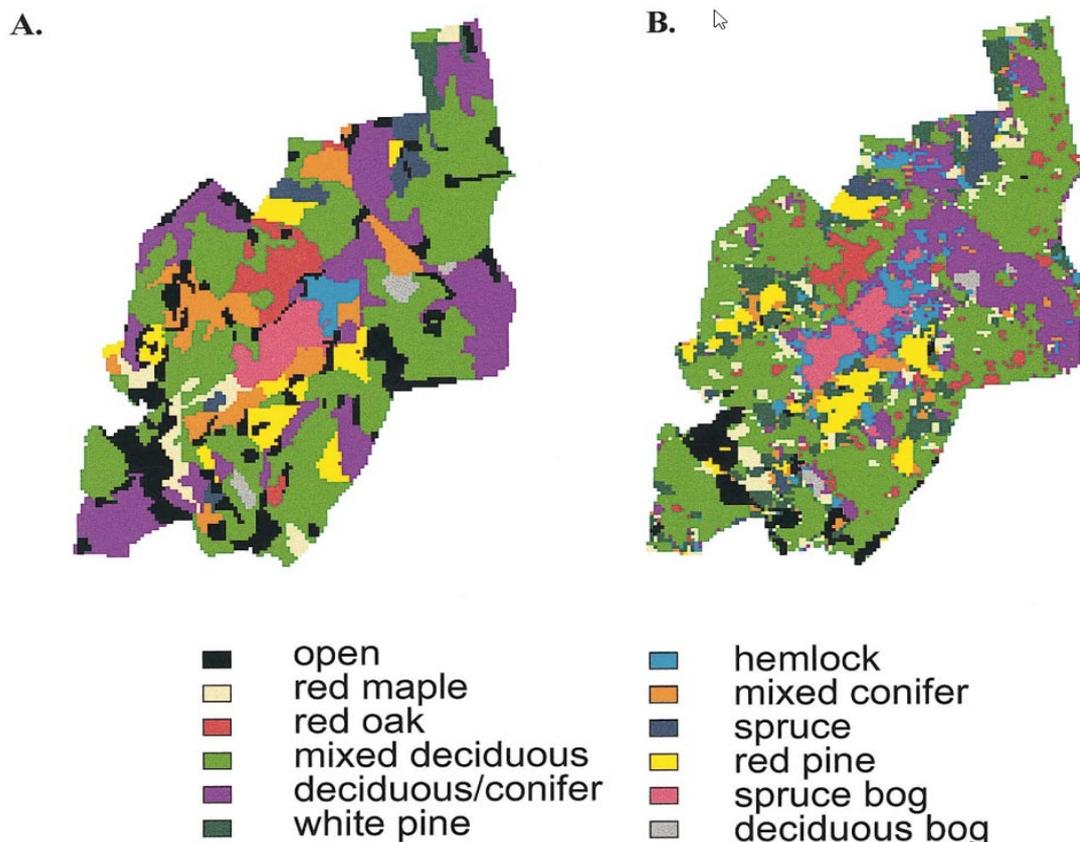


Рис. 1. Классификация видового насаждения: а) определяемая на основе полевых измерений базальной площади; б) классификация видов, полученная на основе данных дистанционного зондирования [Martin et. al, 1998] /

Fig 1. Classification of species stands: (a) determined from field measurements of basal area; (b) classification of species derived from remotely sensed data [Martin et. al., 1998]

видов деревьев: Клен, Граб, Каталпа, Кизил, Бук, Медовая акация и Дуб каштановый (рис. 2).

Были выполнены съемки трехцветного (RGB) и инфракрасного (CIR) форматов летом и осенью. На основе изображений были созданы цифровая модель поверхности (DSM) и мультиспектральный ортофотоплан (рис. 3).

Классификационные тесты доказали, что добавление функций текстуры улучшило общие значения точности. Некоторые виды деревьев, которые были вперемешку с другими в классификации на основе чистых радиометрических полос, были лучше идентифицированы путем применения метода текстур. Исследование доказывает, что использование функций текстуры приводит к значительному увеличению общей точности, значения которой изменяются от 58% до 78% или 87%, в зависимости от уменьшения компонентов [Gini et. al, 2018].

Метод классификации пород деревьев на основе сегментации и спектральных характеристик кроны отдельных деревьев в смешанных лесах представлен китайскими исследователями для национального заповедника Ляншуй на Северо-Востоке Китая.

Для классификации видов деревьев были применены методы опорных векторов «Support vector machine (SVM)» и углов отражения спектра «Spectrumanglermapper (SAM)». Сравнивались результаты классификации по пикселям, полученные на ос-



Рис. 2. Район работ: желтые линии – трассы полета БПЛА, красные треугольники – GPS отметки /
 Fig. 2. Work area: yellow lines – UAV flight paths, red triangles – GPS marks

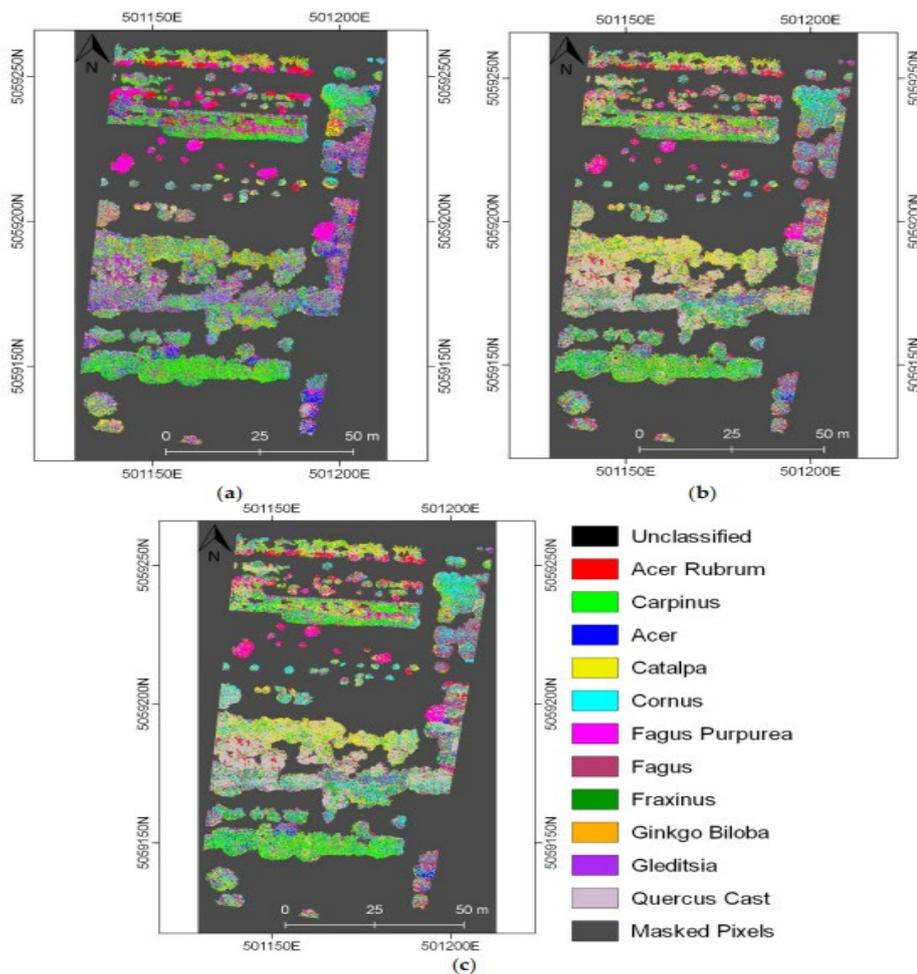


Рис. 3. Классификация видов деревьев по мультиспектральному ортофотоплану (цвета – породы деревьев) /
 Fig. 3. Classification of tree species by multispectral orthophotos

нове мульти – и гиперспектральных данных, и результаты выделения отдельных деревьев по данным LiDAR.

Результаты прямой классификации гиперспектральных изображений показаны на рисунке 4 – с помощью классификаторов SAM и SVM в программе ENVI a, b, наложение результатов выделения отдельных деревьев на результаты классификации – c, d. Окончательные результаты классификации совместно двумя методами приведены на рисунке 5.

Спектральный анализ эффективно определил классы доминирующих и субдоминирующих видов. Согласованность идентификации относительно полевых наблюдений для класса доминирующих видов составляла более 90%. В отличие от этого, согласованность классов субдоминантных видов составила около 60%, а общая согласованность, как метода опорных векторов, так и метода углов отражения спектра составила более 70% [Dan Zhao et. al., 2020].

Еще одно исследование по оконтуриванию деревьев по видам крон, с помощью мультиспектральных снимков, было проведено в природной зоне «College Woods Natural Area (CWNA)», в г. Дарем, США.

Снимки были обработаны программой Agisoft Photo Scan Pro (v. 1.6.2) и построены ортофотоплан, цифровая модель поверхности и модель высоты.

Оценка точности выявления была выполнена сравнением выборки деревьев, с эталонными деревьями. Результаты были представлены в виде матрицы ошибок. В матрице ошибок TP (True Positive) представляет собой количество правильно обнаруженных деревьев. FP (False Positive) – количество обнаруженных деревьев, виды которых не были подтверждены при сравнении с эталонами. FN (False Negative) – ошибка пропуска [Strech et. al., 2008].

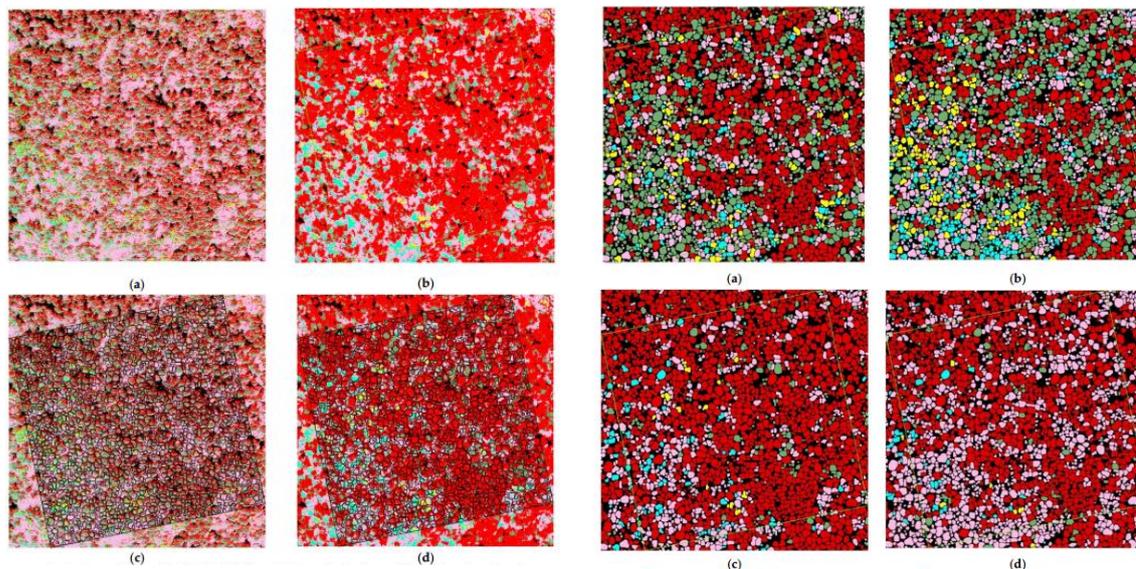


Рис. 4. Классификация деревьев по методам: (a) SAM; (b) SVM; (c, d) SAM и SVM с сегментацией отдельных деревьев; / Fig. 4. Classification of trees by methods: (a) SAM; (b) SVM; (c, d) SAM and SVM with segmentation of individual trees

Рис. 5. Конечные результаты классификации совместно двумя методами / Fig. 5. Final results of classification using two methods together

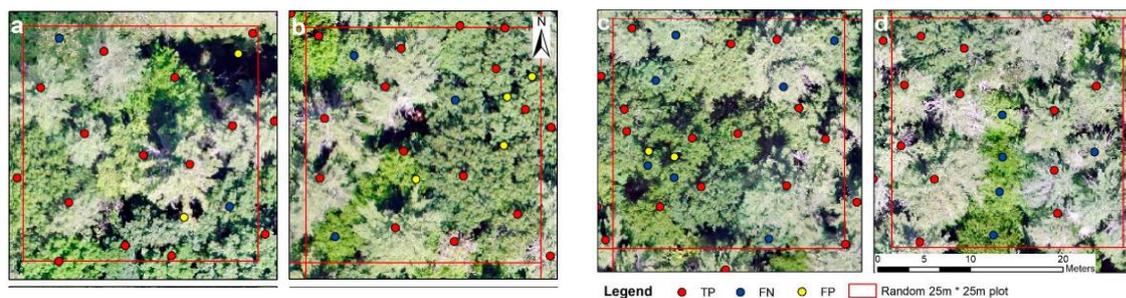


Рис. 6. Примеры распознавания деревьев, по матрице TP, FN и FP [Mohan, et. al., 2017] /
Figure 6. Examples of tree recognition, by TP, FN and FP matrix [Mohan, et. al., 2017]

Всего в эксперименте было обнаружено 4164 дерева со средней высотой 23,35 метра и средним диаметром кроны 7,43 метра. В общей сложности 971 дерево было идентифицировано на 60 случайно выбранных участках и использовано для анализа ошибок. На рисунке 6 показаны четыре примера обнаруженных верхушек деревьев.

Российская компания Topodrone (<https://topodrone.ru/news/article/multispectral/>) представила результаты мультиспектральной аэрофотосъемки лесного массива в провинции Pohjois-Karjala, Финляндия и показала возможность создания высокоточного ортофотоплана в мультиспектральном и видимом диапазонах.

Съемки проводились квадрокоптером DJI PHANTOM 4PRO с геодезическим навигационным приемником GNSS и мультиспектральной камерой PARROT SEQUOIA, что позволило выполнить съемку и получить координаты положения дрона с точностью до одного сантиметра.

После обработки GNSS измерений с высокой точностью определяются координаты изображений, затем данные обрабатываются в ПО для фотограмметрической обработки, и строятся цифровая модель рельефа и ортофотоплан с высокой точностью привязки.

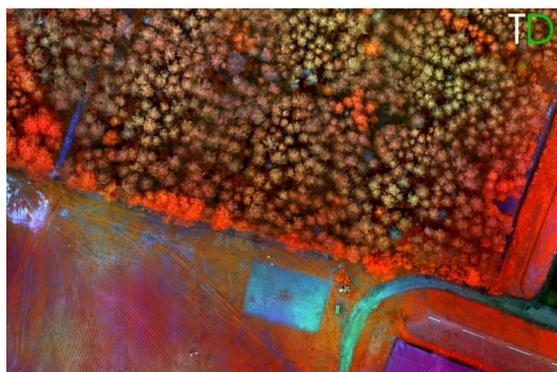
Для создания этого набора данных не потребовалось выполнение дополнительных работ по закладке наземных опорных точек, что позволило упростить процесс полевых работ в лесном массиве и значительно сократило сроки и стоимость выполнения проекта.

Совместная обработка полученных данных позволила определить вид, местоположение и высоту деревьев, а также выявить поврежденные и засыхающие растения дистанционно (рис. 7, 8).

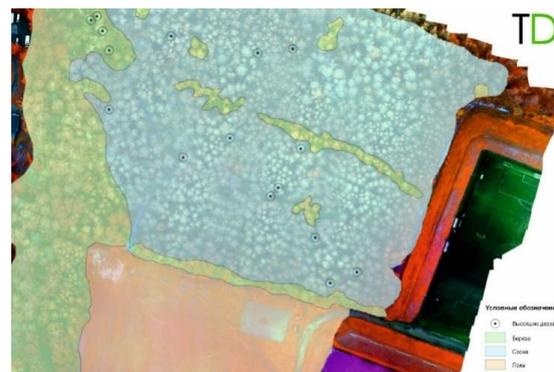
Таким образом, квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro с мультиспектральной камерой SEQUOIA позволил решить задачу мониторинга и таксации лесов, определения качественных и количественных характеристик лесных массивов, контроля вырубок [Алешко и др., 2020].

В 2019 году молодые ученые из Красноярского политехнического техникума представили квадрокоптер собственной сборки с установленным на нем помимо вспомогательных блоков модулем мультиспектральной камеры MapirSurvey 3, для определения вегетационного индекса NDVI, требующего проведения аэрофотосъемки в видимой и ближней ИК областях, что является основным инструментом получения информации о поражении леса [Рахматуллина и др., 2021].

Съемка проводилась согласно полетной траектории через определенное расстояние, исходя из фокусного расстояния объектива и разрешения сенсора. Перекрытие составило 50-70%. Обработка полученных изображений проводилась в



*Рис. 7. Ортофотоплан по данным
мультиспектральной съемки /
Fig. 7. Multispectral Orthophotoplane*



*Рис. 8. Классификация
мультиспектральных данных /
Fig. 8. Classification of multispectral data*

программе Agisoft Meta Shape professional с получением ортофотомозаики исследуемого участка леса. Дальнейшую обработку изображений можно производить в открытой программе Quantum GIS, что позволит определить пораженные по различным причинам участки леса [Акимов и др., 2019].

В докладе российских ученых «Возможности обработки и анализа данных сверхлёгкого БПЛА Sense Flye Vee в лесном хозяйстве» представлен пример фотограмметрической обработки и спектрального анализа данных, полученных с беспилотника Sense Flye Vee в сфере лесного хозяйства с применением сенсоров в различных диапазонах спектра.

Из данного доклада наиболее значимыми результатами обследования лесного участка для нас являются: карта степени фотосинтетической активности (рис. 8), подсчёт количества деревьев различных пород (рис. 9), анализ точности полученных результатов по материалам таксации.

Исходя из анализа, результаты позволяют построить карты вегетационных индексов с точностью 98%, подсчитывать количество крон различных пород с точностью 90%, строить границы выделов с точностью от 70% и проводить по ним статистическую обработку данных [Галецкая и др., 2015].

В мае 2022 года в журнале издательства MDPI, Sustainability вышла статья большой группы авторов из Бразилии «CO₂ Flux Model Assessment and Comparison between an Airborne Hyperspectral Sensor and Orbital Multispectral Imagery in Southern Amazonia (Оценка и моделирование выделения CO₂ и сравнение гиперспектрального зондирования с воздуха спутниковых мультиспектральных съемок в Южной Амазонии).

В своих исследованиях они сравнили полученные модели CO₂ Flux (выделение CO₂) с использованием четырех различных систем спутниковой съемки (Landsat 8, Planet Scope, Sentinel-2 и Aisa Fenix) в северной части штата Мату-Гросу, южная часть бразильской Амазонии. Исследуемая территория охватывает три различных вида землепользования: первичный тропический лес, голые почвы и пастбища. Обработка и радиометрическая калибровка позволили провести параметризованное сравнение величины CO₂ Flux, а также вегетационного индекса NDVI и фотохимического индекса PRI. Полученные результаты свидетельствуют о том, что снимки Planet Scope, MSI/Sentinel-2, OLI/Landsat-8 и AisaFENIX могут быть одинаково масштабированы, то есть изменчивость данных вдоль неоднородной сцены в вечнозеленом тропическом лесу схожа.

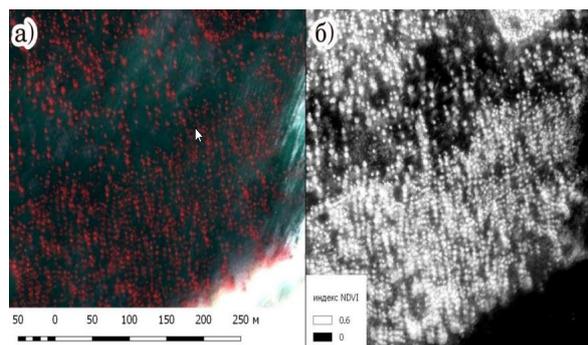


Рис. 11. Карта степени фотосинтетической активности: псевдоцветное отображение (а) и карта индексов NDVI (б) /
 Fig. 11. Map of the degree of photosynthetic activity: pseudocolor display (a) and NDVI index map (b)

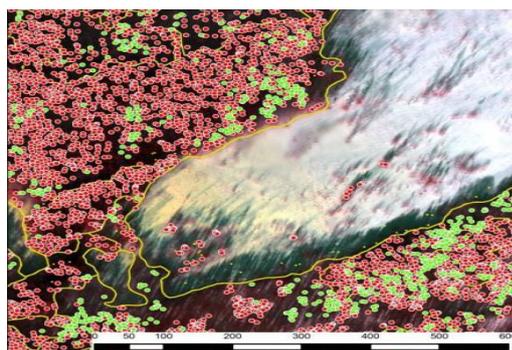


Рис. 12. Пример выделения деревьев различных пород /
 Fig. 12. Example of selecting trees of different species

В своих выводах ученые подчеркивают, что результаты их исследований позволяют лучше понять, как объединение и/или комбинация различных наборов данных, полученных с воздуха и орбиты, может обеспечить надежные оценки эмиссии и поглощения углерода в различных наземных экосистемах южной Амазонии а зависимость от выбросов и поглощения CO_2 пространственно-временной динамики сезонности осадков должна быть углубленно исследована в дальнейших исследованиях [João Lucas Della-Silva et al., 2022].

ВЫВОДЫ

Недостатком использования традиционных методов классификации космических снимков является зависимость спектральной яркости от сезонности, состояния атмосферы, положения носителя, ориентации съемочной камеры, а также ее типа и характеристики. Эти факторы влияют на достоверность дешифрирования, появляется необходимость исследования других признаков, характеризующих свойства лесной растительности [Манович и др., 2013]. Главное ограничение по применению аэрофотосъемки для мониторинга лесного хозяйства – высокая стоимость работ.

Мониторинг с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – метод, который включает в себя почти все достоинства и практически исключает все недостатки вышеперечисленных способов оценки и является наиболее доступным с финансовой и технологической точки зрения.

За последние годы мультиспектральная и лидарная съемки с использованием БПЛА, оснащенных глобальной навигационной спутниковой системой и инерциальной навигационной системой, все чаще используются для различных научных исследований окружающей среды, включая фотограмметрию и дистанционное зондирование [Colomina, Molina, 2014].

Низкая рабочая высота съемки с помощью БПЛА позволяет получать данные сверхвысокого разрешения. Данная особенность – способность генерировать изображения сверхвысокого разрешения в гибких временных масштабах позволяет нам заполнить пробел между полевыми исследованиями более мелкого масштаба и спутниковыми снимками глобального масштаба. И наконец, если в спутниковом дистанционном зондировании спектральные характеристики в основном используются для

грубого картирования почвенно-растительного покрова, то на снимках камер сверхвысокого разрешения полученных с помощью БПЛА спектральные характеристики позволяют дифференцировать поверхности на более детальном уровне, увеличивая количество различных классов (например, различных типов растительности).

Литература

1. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М.: Наука, 1993. – 293 с.
2. Гуня А. Н., Гакаев Р. А. Ландшафтная структура как основа для оценки динамики углерода в горах (на примере Макажойской котловины). // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XI. / Под ред. И. А. Керимова, В. А. Широковой, В. Б. Заалишвили, В. И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2021. – С. 332-339.
3. Гуня А. Н., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш., Алахвердиев Ф. Д. Комплексный подход к оценке изменений в землепользовании и их влияния на динамику углерода в горных ландшафтах Чеченской Республики. // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2021. – Т. 15. №4. – С. 39-52. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52
4. Керимов И. А., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. №3 (25). – С. 35-47.
5. Кудяров В. Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор). // Почвоведение. – 2018. – №6. – С. 643-658.
6. Курбатова А. И. Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотических составляющих углеродного цикла. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2020. – Т. 28. №4. – С. 428-438. DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438.
7. Пашкевич М. А., Коротаева А. Э. Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 170-182. DOI: 10.46698/VNC. 2021.87.18.014.
8. Свалова В. Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (1). – С. 129-147. DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.61.010.
9. Abalori T. A., Cao W., Weobong C. A.-A., Wang S., Anning D. K., Sam F. E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China. // Chilean Journal of Agricultural Research. – 2022. – Vol. 82 (1). – pp. 52-64. DOI: 10.4067/s0718-58392022000100052
10. Amanuel W., Yimer F., Karlton, E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. // Journal of Ecology and Environment. – 2018. – Vol. 42 (1). – pp. 1-11.
11. Ewane E. B. Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192 (8). – pp. 1-35.
12. Garten C. J. Soil carbon dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. – 2004. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57407.pdf>
13. Hilton R. G., West A. J. Mountains, erosion and the carbon cycle. // Nature Reviews Earth and Environment. – 2020. – No. 1. – pp. 284-299. DOI: 10.1038/s43017-020-0058-6.
14. Jakšić S., Ninkov J., Milić S., Vasin J., Živanov M., Jakšić D., Komlen V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13 (15). – p. 8332. DOI: 10.3390/su13158332.

15. Joel L. M., Balthazar M. M., Didas N. K., John B. H., Proches M., Loth S. H., Jozef M., Hubert D. Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. // *Journal of Soil Science and Environmental Management*. – 2016. – Vol. 7 (9). – pp. 123-132. DOI: 10.5897/JSSEM2016.0557
16. Karchegani P. M., Ayoubi S., Mosaddeghi M. R., Honarjoo N. Soil organic carbon pools in particle-size fractions as affected by slope gradient and land use change in hilly regions, western Iran. // *Journal of Mountain Science*. – 2012. – Vol. 9 (1). – pp. 87-95. DOI: 10.1007/s11629-012-2211-2
17. Kurz W. A., Dymond C. C., White T. M., Stinson G., Shaw C. H., Rampley G. J., Smith C., Simpson B. N., Nielson E. T., Trofimow J. A., Metsaranta J., Apps M. J. CMS-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards // *Ecological Modelling*. – 2009. – Vol. 220. – pp. 480-504. DOI: 10.111016/j. ecolmodel. 2008.10.018
18. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. // *InterCarto. InterGIS*. – 2017. – Vol. 23. – pp. 373-382. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382
19. Mugagga F., Nagasha B., Barasa B., Buyinza M. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. // *International Journal of Regional Development*. – 2015. – Vol. 2. No. 1. – pp. 58-75.
20. Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Lesiv M. Yu., Ontikov P. V., Schepaschenko M. V., Kraxner F. Estimation of Forest Area and its Dynamics in Russia Based on Synthesis of Remote Sensing Products. // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2015. – Vol. 8. No. 7. DOI: 10.1134/S1995425515070136.
21. Sleeter B. M., Liu J., Daniel C., Frid L., Zhu Zh. An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics: a case study in the Sierra Nevada Mountains of California. // *AIMS Environmental Science*. – 2015. – Vol. 2 (3). – pp. 577-606. DOI: 10.3934/environsci. 2015.3.577.
22. Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. No. 8. – p. 708. DOI: 10.3390/f10080708

References

1. Bazilevich N. I. Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia. – Moscow. Nauka. 1993. 293 p. (In Russ.)
2. Gunya A. N., Gakaev R. A. Landscape structure as a basis for assessing the dynamics of carbon in the mountains (by the example of the Makazhoy Depression). Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Vol. 11. Edited by I. A. Kerimov V. A. Shirokova, V. B. Zaalishvili, V. I. Cherkashin. Moscow. S. I. Vavilov Institute for the History of Natural Science and Technology, RAN, 2021. pp. 332-339. (In Russ.)
3. Gunya A. N., Gairabekov U. T., Makhmudova L. Sh., Alakhverdiev F. D. An integrated approach to the assessment of the changes in land use and their impact on carbon dynamics in the mountain landscapes of the Chechen Republic. Proceedings of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences. 2021. Vol. 15. No. 4. pp. 39-52. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52 (In Russ.)
4. Kerimov I. A., Gairabekov U. T., Makhmudova L. Sh. Carboniferous polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. Grozny Natural Science Bulletin. 2021. Vol. 6. No. 3 (25). pp. 35-47. (In Russ.)
5. Kudyarov V. N. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink on the territory of Russia (analytical review). Soil science. 2018. No. 6. pp. 643-658. (In Russ.)
6. Kurbatova A. I. Analytical review of modern research on changes in the biotic components of the carbon cycle. Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and

Life Safety. 2020. Vol. 28. No. 4. pp. 428-438. DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438. (In Russ.)

7. Pashkevich M.A., Korotaeva A. E. Analysis of biological methods for quarry wastewater treatment from nitrogen compounds. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (4). pp. 170-182. DOI: 10.46698/VNC. 2021.87.18.014. (In Russ.)

8. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (1). pp. 129-147. DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.61.010. (In Russ.)

9. Abalori T.A., Cao W., Weobong C.A.-A., Wang S., Anning D.K., Sam F.E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2022. Vol. 82 (1). pp. 52-64. DOI: 10.4067/s0718-58392022000100052

10. Amanuel W., Yimer F., Karlton, E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*. 2018. Vol. 42 (1). pp. 1-11.

11. Ewane E.B. Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192 (8). pp. 1-35.

12. Garten C.J. Soil carbon dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. 2004.

13. Hilton R. G., West A. J. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2020. No. 1. pp. 284-299. DOI: 10.1038/s43017-020-0058-6.

14. Jakšić S., Ninkov J., Milić S., Vasin J., Živanov M., Jakšić D., Komlen V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (15). p. 8332. DOI: 10.3390/su13158332.

15. Joel L.M., Balthazar M.M., Didas N.K., John B.H., Proches M., Loth S.H., Jozef M., Hubert D. Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2016. Vol. 7 (9). pp. 123-132. DOI: 10.5897/JSSEM2016.0557

16. Karchegani P.M., Ayoubi S., Mosaddeghi M.R., Honarjoo N. Soil organic carbon pools in particle-size fractions as affected by slope gradient and land use change in hilly regions, western Iran. *Journal of Mountain Science*. 2012. Vol. 9 (1). pp. 87-95. DOI: 10.1007/s11629-012-2211-2

17. Kurz W.A., Dymond C. C., White T. M., Stinson G., Shaw C. H., Rampley G. J., Smith C., Simpson B. N., Nielson E. T., Trofimow J. A., Metsaranta J., Apps M. J. CMS-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*. 2009. Vol. 220. pp. 480-504. DOI: 10.111016/j. ecolmodel. 2008.10.018

18. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. *InterCarto. InterGIS*. 2017. Vol. 23. pp. 373-382. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382

19. Mugagga F., Nagasha B., Barasa B., Buyinza M. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. *International Journal of Regional Development*. 2015. Vol. 2. No. 1. pp. 58-75.

20. Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Lesiv M. Yu., Ontikov P. V., Schepaschenko M. V., Kraxner F. Estimation of Forest Area and its Dynamics in Russia Based on Synthesis of Remote Sensing Products. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. Vol. 8. No. 7. DOI: 10.1134/S1995425515070136.

21. Sleeter B.M., Liu J., Daniel C., Frid L., Zhu Zh. An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics: a case study in the Sierra Nevada Mountains of California. *AIMS Environmental Science*. 2015. Vol. 2 (3). pp. 577-606. DOI: 10.3934/environsci. 2015.3.577.

22. Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. *Forests*. 2019. Vol. 10. No. 8. p. 708. DOI: 10.3390/f10080708

УДК 528

DOI: [10.46698/VNC.2022.72.93.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.72.93.013)

Оригинальная статья

Оценка качества городской среды с применением геоинформационных систем на примере микрорайонов города Краснодара

Д. А. Липилин^{1, 2}, **Д. Д. Евтушенко**^{1, 2}

¹Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
Россия, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, e-mail: LipiLin_dmitrii@mail.ru;

²Кубанский государственный университет, Россия, 350040,
г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

Статья поступила: 21.07.2022, доработана: 22.08.2022, принята к публикации: 07.09.2022

Резюме: Актуальность работы. В связи с активными процессами урбанизации и быстрым увеличением количества городского населения возрастают и требования к качеству городской среды, от которой напрямую зависит комфорт, работоспособность и здоровье проживающего на данной территории населения. Ряд действующих государственных программ направленных на развитие общественных пространств свидетельствует о внимании органов власти к данному вопросу. Таким образом, в статье рассматриваются вопросы анализа качества городской среды трех микрорайонов г. Краснодара с применением технологий пространственного анализа и географических информационных систем. **Цель исследований.** Расчет индикаторов, измерение шумовой обстановки и итогового индекса качества городской среды. На основе полученных результатов провести сравнительный анализ на примере трех микрорайонов различных периодов застройки (1930-1940-е гг., 1970-1980-е гг. и 2010-2020-е гг.). С применением ГИС выявить сильные и слабые стороны каждой территории, вызванные архитектурными особенностями периода проектирования и строительства. **Методика исследований** основана на индикаторах и итоговом индексе качества городской среды, согласно формулам, утвержденным в распоряжении Правительства РФ №510-р от 23 марта 2019 г., и адаптированным под условия исследования и использование ГИС. В исследовании картографическим методом проведён анализ данных шумового загрязнения и отдельных индикаторов качества городской среды. **Результаты работы.** Наибольшее количество баллов по индексу качества городской среды набрал мкр. Горгаз, что соответствует благоприятному уровню (156,1 балл из 220), мкр. Комсомольский и Московский находятся в умеренном диапазоне качества городской среды, их баллы равны 129,5 и 130,8 баллов из 220 соответственно. По уровню шума наиболее благоприятная обстановка выявлена в мкр. Комсомольский. Результаты должны соответствовать поставленным целям и иметь научную составляющую и новизну, т. е. установлено влияние типа и возраста застройки, разработана новая методика и т. п. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании мероприятий по улучшению качества городской среды.

Ключевые слова: геоинформационные системы, ГИС, пространственное моделирование, городская среда, качество городской среды, индекс качества, индикаторы качества, шумовое загрязнение, Краснодар.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках стратегического проекта «Благополучие сельских территорий» программы развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственной аграрный университет имени И. Т. Трубилина» на 2021-2030 гг.

Для цитирования: Липилин Д. А., Евтушенко Д. Д. Оценка качества городской среды с применением геоинформационных систем на примере микрорайонов города Краснодара. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 195-210. DOI: 10.46698/VNC.2022.72.93.013.

DOI: [10.46698/VNC.2022.72.93.013](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.72.93.013)

Original paper

Assessment of the urban environment quality using geoinformation systems by the exam-ple of microdistricts of the city of Krasnodar

D. A. Lipilin ^{1, 2}, D. D. Evtushenko ²

¹ Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, 13 Kalinina str., Krasnodar 350044, Russian Federation, e-mail: LipiLin_dmitrii@mail. ru;

² Kuban State University, 149 Stavropolskaya str., Krasnodar 350040, Russian Federation

Received: 21.07.2022, revised: 22.08.2022, accepted: 07.09.2022

Abstract: Relevance. In connection with the active processes of urbanization and the rapid increase in the number of urban population, the requirements for the quality of the urban environment are also increasing, on which the comfort, working capacity and health of the population living in a given territory directly depend. A number of existing state programs aimed at the development of public spaces testify to the attention of the authorities to this issue. Thus, the article deals with the analysis of the quality of the urban environment of three microdistricts of the city of Krasnodar using spatial analysis technologies and geographic information systems. **Aim.** Calculation of indicators, measurement of the noise situation and the final index of the quality of the urban environment. Based on the results obtained, conduct a comparative analysis on the example of three microdistricts of different periods of development (1930–1940, 1970–1980 and 2010–2020). With the use of GIS, identify the strengths and weaknesses of each territory, caused by the architectural features of the design and construction period. **The research methodology** is based on indicators and the final index of the quality of the urban environment, according to the formulas approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 510-r dated March 23, 2019, and adapted to the conditions of the study and the use of GIS. In the study, using the cartographic method, an analysis of noise pollution data and individual indicators of the quality of the urban environment was carried out. **Results.** For the first time, an analysis of spatially distributed microdistricts of various periods of construction was carried out. The architectural features of the influence of the type of building and the period of construction on individual indicators of the quality of the urban environment are revealed. Thus, the author's methodology adapted for the use of GIS showed the effectiveness of calculating the quality of the urban environment for intracity development. The largest number of points in the urban environment quality index was scored by microdistrict. Gorgaz (156.1 points out of 220), which corresponds to a favorable level. Mkr. Komsomolsky and Moskovsky are in the moderate range of urban environment quality.

Key words: geoinformation systems, GIS, spatial modeling, urban environment, urban environment quality, quality index, quality indicators, noise pollution, Krasnodar.

Acknowledgments: *The article was prepared within the framework of the strategic project «Prosperity of rural territories» of the development program of the federal state budgetary educational institution of higher education «Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin» for 2021–2030.*

For citation: Lipilin D.A., Evtushenko D.D. Assessment of the urban environment quality using geoinformation systems by the example of microdistricts of the city of Krasnodar. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2022. 12(3): 195–210. DOI: 10.46698/VNC.2022.72.93.013.

Введение

В современном мире, в связи с активными процессами роста городов, создание качественной городской среды является одной из важнейших задач. Материальная составляющая городской среды непосредственно влияет на комфортность прожи-

вания в ней, а также имеет прямую взаимосвязь с показателями работоспособности, стрессовой нагрузки и распространения различных заболеваний.

В настоящее время, развитие качественной городской среды в России стимулируется различными государственными программами, которые создаются на основе исследований и анализа недостатков, и преимуществ различных типов внутригородской застройки и общественных пространств.

В предыдущем исследовании данной темы авторами [Липилин, Евтушенко, 2022] приводится опыт расчета индекса качества городской среды (введен распоряжением Правительства РФ от 23.03.2019 г. № 510-р) с применением ГИС-технологий для совсем «молодого» микрорайона города Краснодара – Московского. Созданы карты индикаторов, рассчитан индекс качества, а также измерен и картографирован уровень шумового загрязнения.

В данном исследовании авторами были отобраны еще два микрорайона – Горгаз и Комсомольский, которые отличаются разными временными периодами застройки и вероятно, акцентами архитекторов на различную планировку территории застройки. Поэтому в исследовании мы сконцентрировали внимание на анализе и сравнении результатов, полученных в ходе расчета индикаторов качества городской среды по адаптированной ранее методике исследования [Липилин, Евтушенко, 2022].

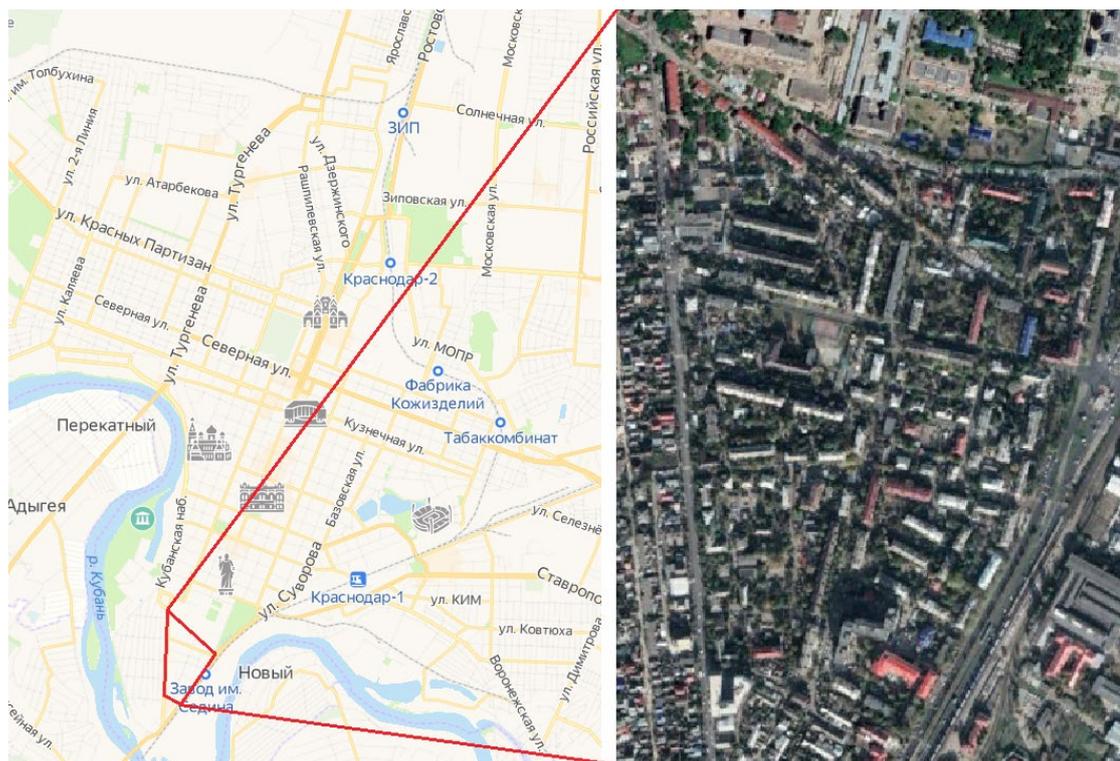
Методика, включающая применение ГИС позволяет автоматизировать процессы расчёта, связанные с определением уровня качества городской среды, повысить наглядность материала, путем визуализации данных картографическими методами.

В ходе исследования изучены работы ряда авторов: по анализу загрязнения городов автомобильным транспортом [Заалишвили и др., 2021], вследствие увеличения плотности потока; в статьях [Ардабацкий, 2017; Овчинников, 2019; Пупшева и др., 2016; Семейкин, 2017; Толстова, Дроздов, 2020] авторы приводят результаты исследования шумового загрязнения городской застройки; по проведению измерений шумовой обстановки [Семина, 2019] – автор приводит качественную методику измерения с помощью смартфонов; методы картирования шумовой обстановки рассмотрены в работе [Кошурников, Максимова, 2018], в которых авторы приводят результаты обработки пространственных данных в виде моделей шумового загрязнения.

Принят во внимание опыт российских и зарубежных авторов: по исследованию и расчёту индекса качества городской среды [Шувалова и др., 2020; Энгельгардт и др., 2018; Gura et al., 2019; Wolniak, Jonek-Kowalska, 2020; Medved, 2017], в которых исследователи приводят различные методы получения данных о городской застройке и её влияния на качество города; а также пути создания цифровых моделей городов, которые за счёт применения технологий лазерного сканирования [Gura et al., 2021; Гура и др., 2021], позволяют существенно повысить качество градостроительного планирования.

Объекты исследования

В данном исследовании проведён сравнительный анализ трёх микрорайонов г. Краснодара: Горгаз, Комсомольский и Московский. Выбор данных микрорайонов основан на том, что они являются пространственно-обособленными друг от друга и построены в разные временные периоды (Горгаз – 1930-1950 гг., Комсомольский – 1960-1970 гг., Московский – 2010-2020 гг.), а, следовательно, имеют различные архитектурные концепции и планировки.



*Рис. 1. Мкр. Горгаз г. Краснодара /
Fig 1. Microdistrict Gorgaz of Krasnodar*

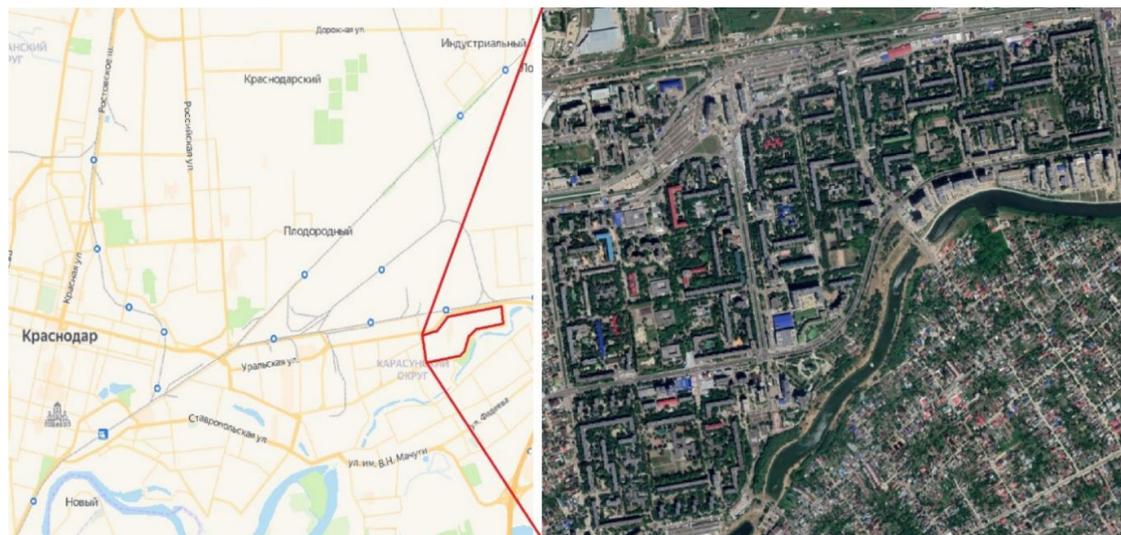
Горгаз – самый южный микрорайон города (рис. 1), входит в состав Западного внутригородского округа муниципального образования г. Краснодар. Он ограничен улицами: Речной с севера, Индустриальной с запада и Захарова с востока. Застроен преимущественно 2-3-хэтажными строениями 30-40-х гг. (около 60%) и пятиэтажными зданиями 50-60-х гг. (около 40%) XX века. Также в микрорайоне имеется современный четырнадцатизэтажный дом на ул. Южная (2009 года постройки).

Микрорайон имеет развитое транспортное сообщение с другими частями города и граничит с историческим центром и мкр. Черемушки [Мосякин, Крицкий, 2021].

Комсомольский – микрорайон г. Краснодара, расположенный в восточной части города, входит в состав Карасунского внутригородского округа (рис. 2). Микрорайон включает улицы Сормовская, Тюляева, Уральская, Приозёрная, Симферопольская, 30-й Иркутской Дивизии и Дзержинского. Состоит из высотных панельных домов 70-80-х гг. XX века. Также, микрорайон включает в себя ЖК «Форт Карасун» – 16-тиэтажные монолитно-кирпичные дома, выполненные в архитектурном стиле современных городских новостроек.

На западе граничит с районом Камвольно-суконного комбината (КСК), на юге и востоке естественной границей микрорайона являются Карасунские озёра, которые отделяют Комсомольский от жилого района посёлка Пашковский, на севере ограничен железнодорожной веткой Северокавказской железной дороги. Основная магистраль – ул. Уральская имеет выход на трассу М-4 Дон.

Московский – это новый (2010-2020 гг. постройки) микрорайон г. Краснодара, расположенный в северной части города, входит в состав Прикубанского внутригородского округа. Состоит преимущественно из 16 этажных панельных многоэтаж-



*Рис. 2. Мкр. Комсомольский г. Краснодара /
Fig. 2. Microdistrict Komsomolsky city of Krasnodar*

ных домов одного типа. Ограничен улицами Солнечная и Зиповская с севера и юга, и улицами Байбакова, Карякина и Российская с запада и востока соответственно, подробное исследование которого было опубликовано ранее [Липилин, Евтушенко, 2022].

Методика исследования

Методика оценки материальной составляющей качества городской среды основана на перечне индикаторов и формул для их расчёта утверждённых распоряжением Правительства № 510-р от 23 марта 2019 г. Индикаторы (36 шт.) формируются из 6 пространств (жилье, улично-дорожная сеть, озелененные пространства, общественно-деловая инфраструктура, социально-досуговая инфраструктура и общегородское пространство), для каждого из которых определены 6 критериев (безопасность, комфортность, экологичность и здоровье, идентичность и разнообразие, современность и актуальность, эффективность управления).

Исходные данные для расчёта ряда индикаторов (например: количество пешеходных переходов, по уровню озеленения, пешеходная доступность социальных объектов) были получены с использованием методов дешифрирования спутниковых снимков (расчёт вегетационных индексов, создание мультитременных композитов и др.), которые также активно применяются в исследованиях природных и антропогенных объектов [Ефремов и др., 2018; Hong Tao et al., 2018].

Для расчёта итогового индекса качества городской среды нами были исключены 14 неподходящих индикаторов, вследствие того, что они являются нерепрезентативными для отдельных микрорайонов (например: разнообразие услуг в общественно-деловых районах города или доля населения города, работающего в непромышленном секторе экономики) или учитывают объекты общегородского статуса (например: памятники, объекты культурного наследия). И был добавлен авторский индикатор – уровень шумовой обстановки. Расчеты и формулы отдельных индикаторов качества городской среды, а также источники данных для их расчёта подробно описаны в ранее опубликованном исследовании авторов [Липилин, Евтушенко, 2022].

Оставшиеся 22 индикатора (рис. 3) могут принимать значения от 1 до 10, на основании которых был рассчитан итоговый индекс качества, согласно формуле (1):

$$I = \sum_{j=1}^n a_j \quad (1)$$

где: I – суммарный индекс качества городской среды; a – индикатор качества городской среды; j – порядковый номер индикатора качества городской среды.

Измерение уровня шумовой обстановки происходило на местности с помощью современных моделей смартфонов в ПО Spectroid по методике, описанной отечественными исследователями [Семина, 2019; Семейкин, 2017], которая позволяет получить результаты с погрешностью не более 5 дБ.

Полученные значения интерполировались на всю территорию района. Основным методом интерполяции данных для построения цифровой модели шумового загрязнения, был выбран метод Кригинга [Vera van Zoest et al., 2019; Chung et al., 2019]. Использование данного метода позволяет получить максимально правдоподобную картину исследуемого явления, а ошибки интерполяции минимальны, чем и обусловлена популярность данного метода в различных исследованиях отечественных и зарубежных географов [Яицкая, Бригида, 2022; Чащин и др., 2020; Xu et al., 2021].

Результаты работы и их обсуждение

Результаты расчетов индикаторов представлены на рисунке 3. На диаграмме изображены полученные значения 22 индикаторов качества городской среды в баллах (от 1 до 10).

Значение баллов индикаторов качества городской среды под номерами 1, 2, 5, 15 и 21 (рис. 3) для всех микрорайонов оказалось максимальным и составило 10 баллов. Так, во всех микрорайонах отсутствуют аварийные здания, все дома оборудованы водопроводом, электричеством и газом (где допускает этажность), для всех домов осуществлен государственный кадастровый учет, все улицы оборудованы освещением, а население имеет доступ к качественной питьевой воде из систем центрального водоснабжения.

Баллы индикаторов под номерами 4, 9 и 14 также остаются на высоком уровне – от 6 до 9 баллов у всех микрорайонов. Данные индикаторы включают: разнообразие услуг – медицинские, образовательные, информационные, юридические, финансовые и другие, которые присутствуют в каждом из исследуемых районов; пешеходная доступность, которая определяет время, которое человек должен потратить при преодолении расстояния от дома до социальных объектов, также остается на высоком уровне; около 2/3 населения микрорайонов проживает на расстоянии до 800 метров от ближайшей зеленой зоны общего пользования.

Значения баллов индикаторов под номерами 13, 17 (рис. 4), 22 являются низкими для всех микрорайонов. Это обусловлено тем, что на озелененных территориях общего пользования имеется небольшое разнообразие услуг, а безопасность передвижения вблизи социальных учреждений является спорной, т.к. для их посещения чаще всего приходится переходить многополосные улицы (Российская, Зиповская, Сормовская, Уральская, Индустриальная), имеющие высокую интенсивность движения, а плотность пешеходных переходов, на которых является невысокой. Данные факты стимулирует жителей переходить дорогу вне оборудованных пе-

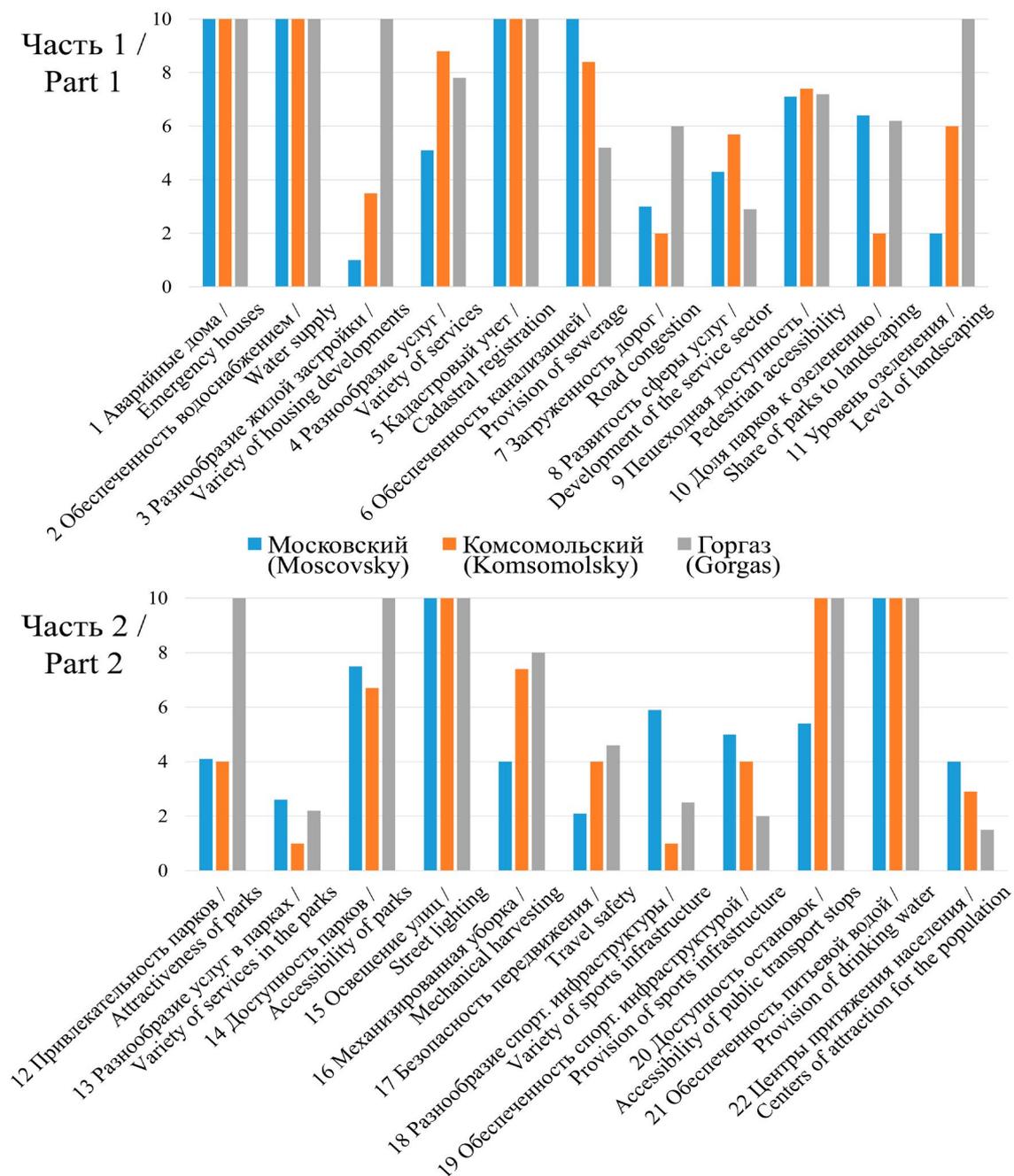


Рис. 3. Индикаторы качества городской среды / Fig. 3. Urban environment quality indicators

шеходных переходов. Кроме того, в микрорайонах отмечена низкая концентрация объектов сферы услуг. Так, на некоторых улицах отмечено менее одного объекта на 100 метров протяженности, что значительно снижает их привлекательность для населения.

Для подсчета итогового индекса качества городской среды было проведено суммирование баллов индикаторов (табл. 1), которые были объединены в 3 группы значений для дальнейшего анализа: неблагоприятная городская среда соответствует значению индекса качества городской среды от 0 до 70, умеренная – от 71 до 150 баллов, благоприятная – от 151 до 220 баллов. Отметим, что в методике расчета

Таблица 1 / Table 1

**Значение индексов качества городской среды /
The value of urban environment quality indices**

Индекс качества городской среды / Urban environment quality index	Микрорайоны / Microdistricts		
	Московский / Moskovsky	Комсомольский / Komsomolsky	Горгаз / Gorgaz
Итоговый балл / Final score	129,5	130,8	156,1
Значение / Meaning	Умеренное / Moderate	Умеренное / Moderate	Комфортное / Comfortable

качества городской среды, представленной в распоряжении Правительства, оценка происходит по двум диапазонам – «благоприятный» и «неблагоприятный». Поэтому, нами было решено выделить «умеренный» диапазон, который, по нашему мнению, избавляет итоговую оценку от контраста, и позволяет более качественно оценить качество городской среды микрорайонов города.

Из итогового результата расчета индекса качества городской среды (см. табл. 1) следует, что только один микрорайон – Горгаз, оказался в благоприятном диапазоне качества городской среды, индекс которого превысил 150 баллов. Качество городской среды микрорайонов Московский и Комсомольский попало в значение «умеренное». Индекс мкр. Комсомольский оказался немногим выше индекса мкр. Московского, что свидетельствует о примерно равном уровне качества городской среды, и следствием наличия «сильных» и «слабых» сторон у каждого из микрорайонов по ряду индикаторов (например: 10, 11, 16, 20 (см. рис. 3)).

По разнообразию жилой застройки (индикатор 3) лидирует мкр. Горгаз, в котором имеются строения трёх исторических периодов – 30-40-х гг., 50-60-х гг. и современные здания (рис. 5а). В московском микрорайоне имеются только однотипные 16-тиэтажные панельные дома. В мкр. Комсомольский в основном 9-этажные панельные дома 70-80-х гг., незначительно разбавленные современными панельными многоэтажками.

Индикатор 6 показывает (рис. 5б), что в мкр. Горгаз не все улицы обеспечены ливневой канализацией, и балл остается на среднем уровне. При этом в других микрорайонах данный индикатор имеет более высокий уровень.

Загруженность дорог (индикатор 7) значительно выше в Комсомольском (рис. 6) и Московском микрорайонах, т. к. вблизи проходят магистральные ул. Уральская и ул. Российская, загруженность которых в пиковые часы может достигать 8-9 баллов. По периферии мкр. Горгаз проходит большая многополосная магистральная улица Захарова, на которой пробок почти не наблюдается, и ул. Индустриальная, также с незначительными пробками.

Микрорайоны Горгаз и Комсомольский (рис. 7) имеют большую долю дорог собираемых механизированным способом (индикатор 16), чем в мкр. Московский.

Наилучшая ситуация доступности остановок общественного транспорта (индикатор 20) наблюдается в микрорайонах Горгаз (рис. 8а) и Комсомольский. В микрорайонах проходят трамвайные ветки, а по периферийным улицам ходят автобусы и маршрутные такси. Для жителей мкр. Московского в непосредственной близости имеется только одна улица с остановками общественного транспорта – Российская, однако, добраться до нее возможно только по улицам Зиповская и Солнечная, на-

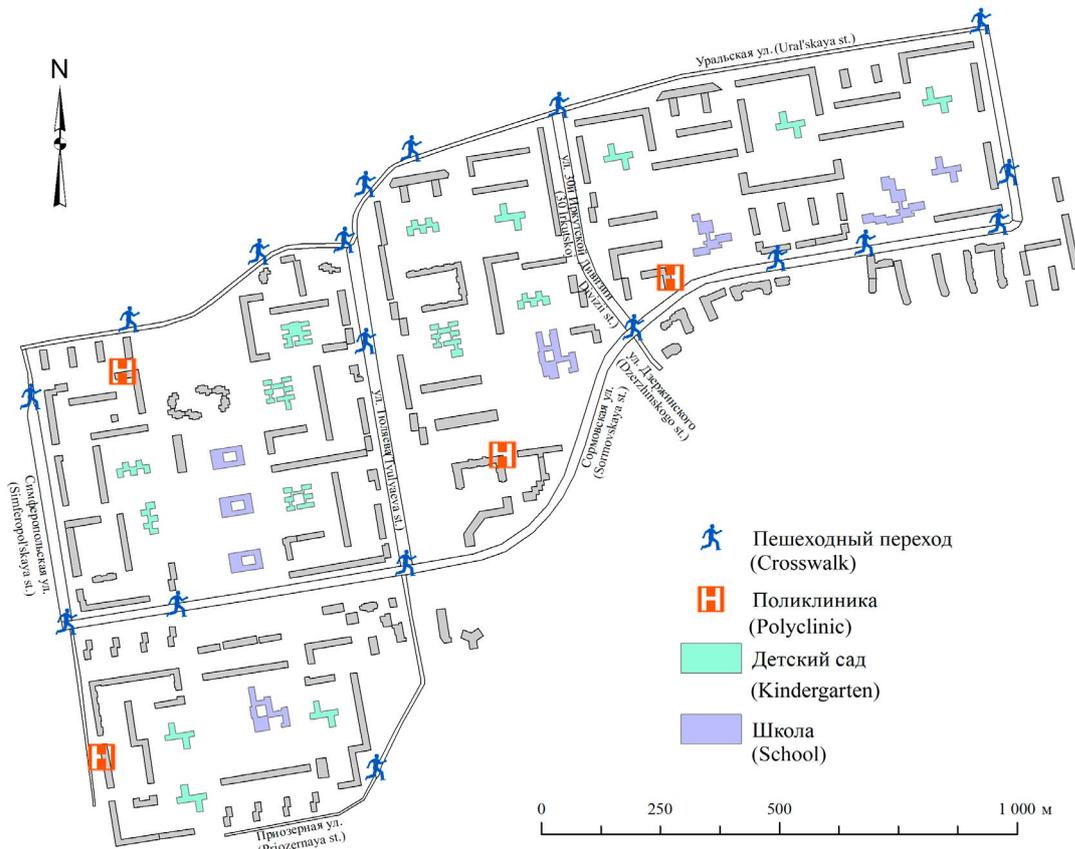


Рис. 4. Карта безопасности передвижения вблизи социальных объектов мкр. Комсомольский /
 Fig 4. Map of movement security near social facilities md. Komsomolsky



Рис. 5. Карта разнообразия жилой застройки (а) и улиц, обеспеченных ливневой канализацией мкр. Горгаз (б) /
 Fig. 5. A map of the diversity of residential development (a) and streets provided with storm sewers of the microdistrict Gorgaz (b)

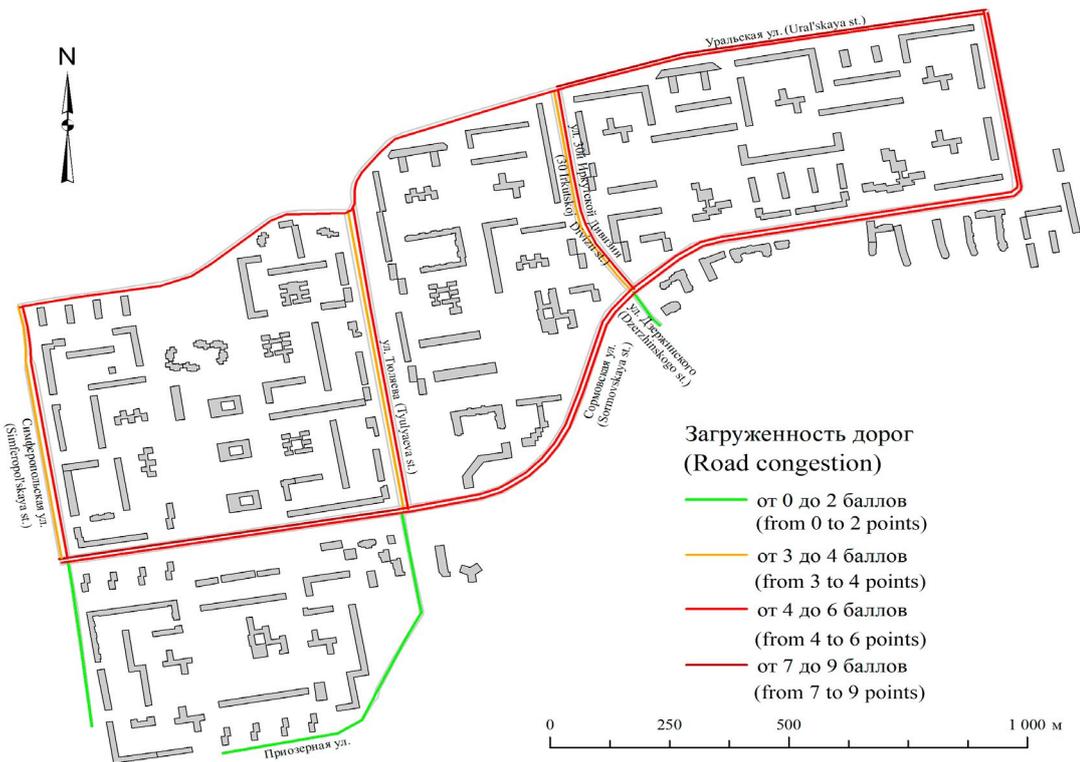


Рис. 6. Карта загруженности дорог мкр. Комсомольский / Fig. 6. Road congestion map Komsomol



Рис. 7. Карта улиц Комсомольского мкр., убираемых механизированными способами / Fig. 7. Map of the streets of the Komsomolsk microdistrict, harvested by mechanized methods

ходящимся на периферии микрорайона, что в значительной степени увеличивает временные затраты.

В мкр. Комсомольский оказалось больше всего улиц с развитой сферой услуг (индикатор 8), у других микрорайонов этот показатель остается на низком уровне.

Индикатор 10, показывающий наличие озелененных территорий общего пользования в сравнении с общей площадью озеленения, остается на высоком уровне у микрорайонов Московский и Горгаз. У мкр. Комсомольский площадь озелененных территорий общего пользования значительно меньше.

Уровень озеленения территории (индикатор 11) микрорайонов Комсомольский и Горгаз составляет от 40% до 60%. В свою очередь, мкр. Московский в значительно меньшей степени засажен растительностью.

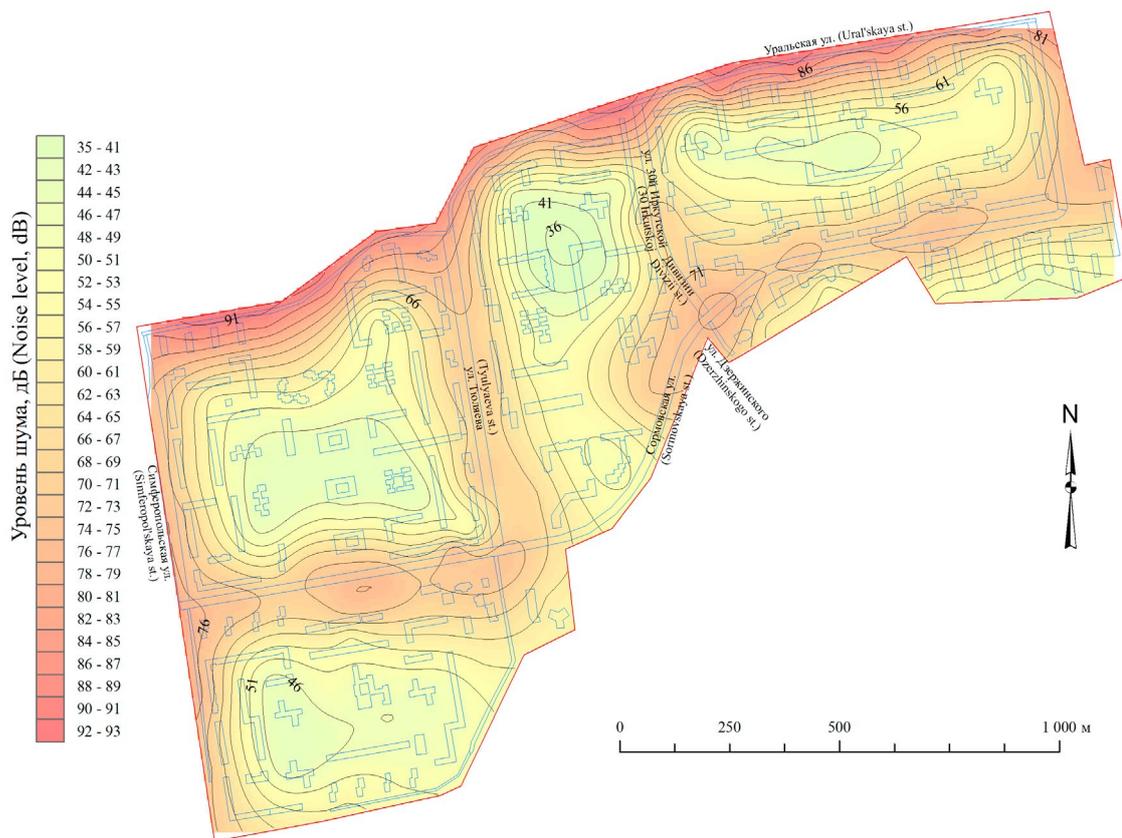
Привлекательность зеленых насаждений (индикатор 12) наблюдается на одинаково невысоком уровне у микрорайонов Московский и Комсомольский, вблизи которых расположены 2 небольших сквера. Мкр. Горгаз же находится рядом с одной из красивейших зелёных территорий города – парком «Городской сад», являющимся популярным местом отдыха у горожан.

Проблемой для микрорайонов Комсомольский и Горгаз являются разнообразие и наличие спортивной инфраструктуры, а нормативы приказа Министерства спорта РФ от 24 февраля 2021 г. № 108 «О рекомендованных нормативах и нормах обеспеченности населения объектами спортивной инфраструктуры» соблюдены только в мкр. Московский (средний уровень).

При анализе степени шумового загрязнения микрорайонов, складывается следующая ситуация: шум в микрорайонах Московский и Комсомольский (рис. 9) на



Рис. 8. Карты общественного транспорта мкр. Горгаз (а); шумового загрязнения мкр. Горгаз (б)/
 Fig. 8. Public transport map Gorgaz (a); noise pollution md. Gorgaz (b)



*Рис. 9. Карта шумового загрязнения мкр. Комсомольский (б) /
Fig. 9. Map of noise pollution md. Komsomolsky (b)*

периферии достигает 70-80-ти баллов, что, согласно требованиям СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» превышает предельно допустимый уровень шума на территории, непосредственно прилегающей к жилым зданиям. Согласно построенным картам, источником шума является непосредственная близость многополосных автодорог к жилым домам: улицы Зиповская, Солнечная, Российская в мкр. Московский и улицы Сормовская и Тюльева соответственно в мкр. Комсомольский. Отдельно отметим, что в мкр. Комсомольский уровень шума в центральных частях низкий и составляет около 35-45 дБ, что соответствует громкости обычной человеческой речи. Шумовая обстановка на территории мкр. Горгаз (рис. 8б) более благоприятная. Уровень шума на периферийных территориях не превышает 70 баллов.

Выводы

В ходе исследования был выполнен расчет индикаторов и индекса качества городской среды для двух микрорайонов Комсомольский и Горгаз. С учётом имеющихся данных прошлых исследований (по мкр. Московский) впервые проведён сравнительный анализ трёх пространственно-распределённых микрорайонов, различных исторических периодов строительства в рамках одного города. По адаптированной авторами методике построены карты индикаторов, и шумового загрязнения, на основе которых проведен анализ полученных результатов индекса качества городской среды. Выявлены «сильные» и «слабые» места исследуемых территорий, что свидетельствует о наличии определённых архитектурных особенностей типа застройки в зависимости от периода строительства.

Наиболее благоприятным в материальной составляющей города, которая оценивается с помощью индекса качества городской среды, оказался самый старый микрорайон – Горгаз. Преимуществами района оказались разнообразие жилой застройки, низкая загруженность дорог, привлекательность озелененных территорий. В исторический период 30-40-х гг. также большее внимание уделялось уровню озеленения, индикатор которого до настоящего времени остается на высоком уровне. Однако, в микрорайоне наблюдается недостаточное развитие сферы услуг, а также малое количество культурно-досуговой и спортивной инфраструктуры.

Комсомольский микрорайон оказался на умеренном уровне благоприятности городской среды. Преимуществами микрорайона застройки 70-80-х гг. оказались низкий уровень шума, высокая развитость и разнообразие сферы услуг. Недостатки выражены однообразной жилой застройкой, высокой загруженности дорог, недостаточном количестве культурно-досуговой и спортивной инфраструктуры, а также низкой доле озелененных территорий общего пользования.

В свою очередь, самый молодой, мкр. Московский, постройки начала XXI века набрал меньше всего баллов, однако у него тоже есть свои преимущества перед другими микрорайонами, такие как большое разнообразие и количество культурно-досуговой и спортивной инфраструктуры, обеспеченность всего объекта ливневой канализацией. Среди недостатков, которых оказалось значительно больше, наблюдается высокий уровень шумового загрязнения, низкая безопасность передвижения вблизи социальных объектов на ряде улиц, слабый уровень озеленения территории и однообразие жилой застройки.

В дальнейших исследованиях авторами планируется расширить исследуемые территории, а также применить большее количество индикаторов качества городской среды, что позволит создать ряд новых картографических материалов для анализа: карту нормализованного вегетационный индекса качества городской среды, согласно методике [Сергеева, Пирожков, 2021], домов в аварийном состоянии или анализа дорожно-транспортных происшествий, как одного из индикаторов безопасности городской среды [Атаев и др., 2019; Атаев, Геллер, 2020].

В связи с тем, что расчеты индикаторов качества городской среды выполнены на основе объективных и реальных исходных данных, стоит учитывать, что при расчете индикаторов для территории всего города Краснодара по утвержденной Правительством методике, итоговый индекс качества городской среды микрорайонов может измениться как в лучшую, так и в худшую стороны, что объясняется увеличением охвата территории, влиянием общегородских объектов и индикаторов других (смежных) районов.

Литература

1. Ардабацкий С. А. Теоретические и практические аспекты проблемы шумового загрязнения. // *Bulletin of Medical Internet Conferences*. – 2017. – Т. 7. С. 1138.
2. Атаев П. Г., Геллер Р. М., Липаткин Д. В. Методика анализа дорожно-транспортных происшествий с пострадавшими на примере Санкт-Петербурга. // «Транспорт Российской Федерации». – 2019. – № 5 (84). – С. 50-53.
3. Атаев П. Г., Геллер Р. М. Современные методы анализа аварийности на дорогах. // *Ленинградский дорожник*. – 2020. – № 1 (003). – С. 40.
4. Гура Д. А., Беспятчук Д. А., Самарин С. В., Кирюникова М. Н., Лесовая Э. Д. Технология трехмерного лазерного сканирования как средство обеспечения безопасности объектов спортивной инфраструктуры. // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. – 2021. – Т. 13. № 4. – С. 259-263.

5. Заалишвили В. Б., Кануков А. С., Корбесова К. В. Оценка влияния автомобильного движения транспорта на загрязнение урбанизированных территории. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 135-146. DOI 10.46698/VNC.2021.53.63.011.
6. Кошурников Д. Н., Максимова Е. В. Обзор зарубежной и отечественной практики шумового картирования (Noise Mapping) в условиях плотной городской застройки. // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2018. – №3. – С. 27-43. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.03.03
7. Липилин Д. А., Евтушенко Д. Д. Оценка качества городской среды с применением геоинформационных систем на примере Московского микрорайона города Краснодара. // *Региональные геосистемы*. – 2022. – №46 (2). – С. 223-240. DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-223-240.
8. Мосякин Д. С., Крицкий И. В. Плюсы и минусы строительства XX века. // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2021. – №22 (74). – С. 43-47.
9. Овчинников А. П. Оценка шумового загрязнения территории Кировского района г. Ярославль. // *Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сборник статей по материалам СХЛV международной научно-практической конференции, Москва, 09.12.2019 г.* – М.: ООО «Интернаука», 2019. – С. 134-139.
10. Пупшева Л. Н., Вагапова А. Р., Комиссаренко Д. В. Шумовое загрязнение окружающей среды. // *Молодежный научный вестник*. – 2016. – №2 (2). – С. 4-6.
11. Сергеева О. С., Пирожков С. П. Разработка методики расчета площади озеленения города с применением данных дистанционного зондирования земли. // *Географический вестник*. – 2021. – №2 (57). – С. 170-181. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-170-181.
12. Семейкин А. Ю. Оценка шумовой обстановки городской среды в отдельных микрорайонах г. Белгорода. // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. – 2017. – №9. – С. 59.
13. Семина А. Е. Бесплатные мобильные приложения как инструмент оценки шумового воздействия транспортных потоков. // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2019. – №4 (36). – С. 106-114. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.04.10.
14. Ефремов Ю. В., Зимницкий А. В., Шуляков Д. Ю., Липилин Д. А. Снежные Лагонакского нагорья (Западный Кавказ). // *Лёд и снег*. – 2018. – Т. 58. №3. – С. 359-372. DOI 10.15356/2076-6734-2018-3-359-372.
15. Толстова Ю. О., Дроздов В. В. Шумовое загрязнение городской среды Санкт-Петербурга в пределах Кировского и Красносельского районов. // *Вестник науки и образования*. – 2020. – №15-1 (93). – С. 69-73.
16. Чашин А. Н. Картографирование агрохимических свойств почвы с применением обычного кригинга. // *АгроЭкоИнфо*. – 2020. – №1 (39). – С. 10.
17. Шувалова Е. Д., Липилин Д. А., Пелина А. Н. Оценка комфортности среды города Краснодара. Региональные географические исследования. // *Сборник научных трудов*. / Под общей редакцией А. В. Погорелова. – Краснодар, 2020.
18. Энгельгардт А. Э., Липовка А. Ю., Федченко И. Г. Международный опыт индексирования качества городской среды. // *Урбанистика*. – 2018. – №4. – С. 77-87.
19. Яицкая Н. А., Бригида В. С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 162-173. – DOI 10.46698/VNC.2022.86.27.012
20. Chung Sung Yong, Venkatramanan S., Elzain Hussam Eldin, Selvam S, Prasanna M. V. Supplementing missing data on peak-type groundwater level fluctuations using geostatistical methods. GIS and geostatistical methods for the study of groundwater. // Elsevier. – 2019. – pp. 33-41. DOI: 10.1016/b978-0-12-815413-7.00004-3. ISBN 978-0-12-815413-7. S2CID 189989265.
21. Gura D. A., Dyakova N. A., Malimonenko P. S. Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects. Moscow: IOP Publishing Ltd, 2021. – pp. 012165. – DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012165.

22. Gura D.A., Markovsky I.G., Khakhuk B.A., Pshidatok S.K. About prospects for the air laser scanning technology implementation for obtaining a digital model of densely built-in territories. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. // International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development». Hydrometeorological and Geodetic Research in the Building Area. – 2019. – p. 044014.

23. Hong Tao, Manqi Li, Ming Wang, Guonian Lü. Genetic algorithm-based method for forest type classification using multi-temporal NDVI from Landsat TM imagery. – 2018. – pp. 33-43.

24. Xu J., Zhang F., Ruan H., Hu H., Liu Y., Zhong K., Jing W., Yang J.I., Liu X.. Hybrid modelling of random forests and kriging with sentinel-2A multispectral imagery to determine urban brightness temperatures with high resolution. // International Journal of Remote Sensing. – 2021. – Vol. 42. No 6. – pp. 2174-2202. DOI: 10.1080/01431161.2020.1851801

25. Wolniak R., Jonek-Kowalska I. The level of the quality of life in the city and its monitoring. Innovation. // The European Journal of Social Science Research. Silesian University of Technology. – 2020. DOI: 10.1080/13511610.2020.1828049

26. Medved S. Urban Environment and Local Climate. // Building Physics. University of Ljubljana. – 2017. DOI: 10.1007/978-3-030-74390-1

27. Van Zoest V., Osei F.B., Hoek G., Stein A. Spatiotemporal regression kriging for modelling urban NO₂ concentrations, International. // Journal of Geographical Information Science. – 2020. – Vol. 34 (5). – pp. 851-865. DOI: 10.1080/13658816.2019.1667501

References

1. Ardabatsky S.A. Theoretical and practical aspects of the problem of noise pollution. IN AND. Razumovsky of the Ministry of Health of Russia. Bulletin of Medical Internet Conferences, 2017. p. 1138. (In Russ.)

2. Ataev P.G., Geller R.M., Lipatkin D.V. Methodology for the analysis of road traffic accidents with victims on the example of St. Petersburg. «Transport of the Russian Federation». 2019. No. 5 (84) 2019. (In Russ.)

3. Ataev P.G., Geller R.M. Modern methods for analyzing accidents on the roads. Dornadzor LLC. Leningrad Road Worker. 2020. No. 1 (003). p. 40. (In Russ.)

4. Gura D.A., Bespyatchuk D.A., Samarin S.V., Kiryunikova M.N., Lesovaya E.D. 3D laser scanning technology as a means of ensuring the safety of sports infrastructure facilities. Nanotechnologies in construction: scientific online journal. 2021. Vol. 13. No. 4. pp. 259-263. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V. Assessment of the impact of automobile traffic on pollution of urban areas. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 135-146. DOI 10.46698/VNC.2021.53.63.011 (In Russ.)

6. Koshurnikov D.N., Maksimova E.V. Review of foreign and domestic practice of noise mapping (Noise Mapping) in conditions of dense urban development. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanistics. 2018. No. 3. pp. 27-43. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.03.03 (In Russ.)

7. Lipilin D.A., Evtushenko D.D. Assessment of the quality of the urban environment using geographic information systems on the example of the Moscow microdistrict of the city of Krasnodar. Regional Geosystems. 2022. Vol. 46 (2). pp. 223-240. DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-223-240 (In Russ.)

8. Mosyakin D.S., Kritsky I.V. Pros and cons of the construction of the XX century. Construction and technogenic safety. 2021. No. 22 (74). pp. 43-47. (In Russ.)

9. Ovchinnikov A.P. Evaluation of noise pollution in the territory of the Kirovsky district of Yaroslavl city. Young researcher: challenges and prospects: collection of articles based on the materials of the CXLV international scientific and practical conference, Moscow, 09 December 2019. Moscow. Limited Liability Company “Internauka”, 2019. pp. 134-139. (In Russ.)

10. Pupsheva L. N., Vagapova A. R., Komissarenko D. V. Noise pollution of the environment. *Youth Scientific Bulletin*. 2016. No. 2 (2). pp. 4-6. (In Russ.)
11. Sergeeva O. S., Pirozhkov S. P. Development of a methodology for calculating the green area of a city using data from remote sensing of the earth. *Geographic Bulletin*. 2021. No² (57). pp. 170-181. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-170-181 (In Russ.)
12. Semeikin A. Yu. Evaluation of the noise situation of the urban environment in certain microdistricts of Belgorod. *Vestnik BSTU im. V. G. Shukhov*. 2017. No. 9. pp. 59. (In Russ.)
13. Semina A. E. Free mobile applications as a tool for assessing the noise impact of traffic flows. Perm National Research Polytechnic University. UDC 711, 534.8. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.04.10. (In Russ.)
14. Efremov Yu. V., Zimnitsky A. V., Shulyakov D. Yu., Lipilin D. A. Snowfields of the Lagonaki Highlands (Western Caucasus). *Ice and snow*. 2018. Vol. 58. No. 3. pp. 359-372. DOI 10.15356/2076-6734-2018-3-359-372 (In Russ.)
15. Tolstova Yu. O., Drozdov V. V. Noise pollution of the urban environment of St. Petersburg within the Kirovsky and Krasnoselsky districts. *Bulletin of science and education*. 2020. No. 15-1 (93). pp. 69-73. (In Russ.)
16. Chashchin A. N. Mapping of soil agrochemical properties using conventional kriging. *AgroEcoInfo*. 2020. No. 1 (39). pp. 10. (In Russ.)
17. Shuvalova E. D., Lipilin D. A., Pelina A. N. Evaluation of the comfort of the environment of the city of Krasnodar. *Regional geographic research. Collection of scientific papers. Under the general editorship of A. V. Pogorelov. Krasnodar, 2020.* (In Russ.)
18. Engelgardt A. E., Lipovka A. Yu., Fedchenko I. G. International experience of indexing the quality of the urban environment. *Urbanistics*, 2018-4. (In Russ.)
19. Yaitskaya N. A., Brigida V. S. Geoinformation technologies for solving three-dimensional geo-environmental problems: spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 162-173. – DOI 10.46698/VNC. 2022.86.27.012 (In Russ.)
20. Chung Sung Yong, Venkatramanan S., Elzain Hussam Eldin, Selvam S, Prasanna M. V. Supplementing missing data on peak-type groundwater level fluctuations using geostatistical methods. *GIS and geostatistical methods for the study of groundwater. Elsevier*. 2019. pp. 33-41. DOI: 10.1016/b978-0-12-815413-7.00004-3
21. Gura D. A., Dyakova N. A., Malimonenko P. S. *Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects*. Moscow: IOP Publishing Ltd, 2021. pp. 012165. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012165
22. Gura D. A., Markovsky I. G., Khakhuk B. A., Pshidatok S. K. About prospects for the air laser scanning technology implementation for obtaining a digital model of densely built-in territories. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development». Hydrometeorological and Geodetic Research in the Building Area*. 2019. pp. 044014.
23. Hong Tao, Manqi Li, Ming Wang, Guonian Lü. Genetic algorithm-based method for forest type classification using multi-temporal NDVI from Landsat TM imagery. 2018. pp. 33-43.
24. Xu J., Zhang F., Ruan H., Hu H., Liu Y., Zhong K., Jing W., Yang J. I., Liu X.. Hybrid modelling of random forests and kriging with sentinel-2A multispectral imagery to determine urban brightness temperatures with high resolution. *International Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 42. No. 6. pp. 2174-2202. DOI: 10.1080/01431161.2020.1851801
25. Wolniak R., Jonek-Kowalska I. The level of the quality of life in the city and its monitoring. *Innovation. The European Journal of Social Science Research. Silesian University of Technology*. 2020. DOI: 10.1080/13511610.2020.1828049
26. Medved S. *Urban Environment and Local Climate. Building Physics. University of Ljubljana*. 2017. DOI: 10.1007/978-3-030-74390-1
27. Van Zoest V., Osei F. B., Hoek G., Stein A. Spatiotemporal regression kriging for modelling urban NO₂ concentrations, *International Journal of Geographical Information Science*. 2020. Vol. 34 (5). pp. 851-865. DOI: 10.1080/13658816.2019.1667501

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

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

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

Инструкция для авторов

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

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

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

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

Правила оформления статьи

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

INFORMATION FOR AUTHORS

The journal “Geology and Geophysics of 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 , const , \sin , \cos , \min , \max , etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and ν , e and l, h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in

formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 3. 2022 г. Том 12)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 28.09.2022 г. Формат 60×84 1/8.

Дата фактического выхода 10.10.2022 г.

Усл. печ. лист 25,0. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 98.

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