

ISSN 1026–2237

DOI 10.18522/1026–2237

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский  
регион*

---

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2021

2

## Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

### Главная редакция:

М.А. Боровская (главный редактор),  
В.Е. Закруткин (заместитель главного редактора),  
Е.А. Шинкаренко (ответственный секретарь)

### Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, чл.-корр. РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия  
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Россия  
В.И. Колесников – академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия  
Ю.Ф. Коробейник – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНЦ РАН, Россия  
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр, Южный научный центр РАН, Россия  
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия  
Э.З. Эмирбеков – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.Н. Труфанов – зам. председателя редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
О.С. Безуглова – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Н.И. Бойко – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.В. Бочкарев – доктор геол.-мин. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия  
Л.С. Ворович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия  
О.Н. Демина – доктор биол. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия  
А.Г. Захаров – доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Л.М. Зубов – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
М.И. Карякин – доктор физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия  
С.Б. Климентов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
С.И. Колесников – кандидат геогр. наук, доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Е.М. Колосова – кандидат физ.-мат. наук, Южный федеральный университет, Россия  
Г.В. Куповых – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
С.В. Курбатов – доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.М. Лерер – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.А. Миноранский – доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.В. Онищенко – доктор геогр. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия  
О.В. Назаренко – кандидат геогр. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия  
Г.В. Пироговская – доктор с.-х. наук, профессор, Институт почвоведения и агрохимии НАН РБ, Белоруссия  
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика  
Ю.А. Устинов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
П. Фатталь – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция  
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Т.А. Ватульян – ответственный секретарь по издательской деятельности журнала, Южный федеральный университет, Россия

### Учредители:

Дагестанский государственный технический университет,  
Дагестанский государственный университет,  
Донской государственный технический университет,  
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,  
Кубанский государственный технологический университет,  
Ростовский государственный университет путей сообщения,  
Ростовский государственный экономический университет (РИНХ),  
Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова,  
Южный федеральный университет

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, М.С. Шипитко

Подписано в печать 25.06.2021. Выход в свет 28.06.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Шрифт Times. Усл. печ. л. 16,74. Уч.-изд. л. 18,63. Тираж 250 экз. Заказ № 8069

Адрес редакции и издателя (для переписки): 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, ЮФУ,  
журнал «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки»,  
e-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru), адрес в Интернете: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://www.izvestiya.sfedu.ru)

Адрес редколлегии: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110,  
тел.: +7 (863) 218-40-00 доб. 11-093; доб. 11-094.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции  
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,  
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к. 104, тел. +7 (863) 247-80-51

## Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

### Main Edition:

M.A. Borovskaya (Editor-in-Chief),  
V.E. Zakrutkin (Deputy Editor-in-Chief),  
E.A. Shinkarenko (Assistant Editor)

### Editorial Board:

M.A. Borovskaya - Editor-in-Chief, Corresponding Member, Russian Academy of Education, Doctor of Economics, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.E. Zakrutkin - Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.A. Babeshko - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kuban State University, Russia  
B.S. Karamurзов - Doctor of Technical Sciences, Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Russia  
V.I. Kolesnikov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rostov State Transport University, Russia  
Yu.F. Korobeinik - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.G. Kusraev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia  
G.G. Matishov - Academician, Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia  
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia  
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia  
E.Z. Emirbekov - Doctor of Biological Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.N. Trufanov - Deputy Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.V. Abanin - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
O.S. Bezuglova - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia  
N.I. Boiko - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.V. Bochkarev - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Russia  
L.S. Vorovich - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia  
O.N. Dyomina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia  
A.G. Zakharov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia  
L.M. Zubov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chairman of the Editorial Board, Candidate of Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia  
M.I. Karjakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia  
S.B. Klimentov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
S.I. Kolesnikov - Candidate of Geography, Doctor of Agricultural Science, Professor, Southern Federal University, Russia  
E.M. Kolosova - Candidate of Physics and Mathematics, Southern Federal University, Russia  
G.V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
S.V. Kurbatov - Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.M. Lerer - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.A. Minoranskiy - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.V. Onishchenko - Doctor of Geography, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia  
O.V. Nazarenko - Candidate of Geography, Associate Professor, Southern Federal University, Russia  
G.V. Pirogovskaya - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Belarus  
V.S. Rabinovich - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National Polytechnic Institute, Mexico  
Yu.A. Ustinov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
P. Fattal - PhD, Professor, University of Nantes, France  
Yu.A. Fedorov - Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.D. Khovanskiy - Candidate of Geology and Mineralogy, Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia  
T.A. Vatulyan - Assistant Editor for Publishing of the Journal, Southern Federal University, Russia

### The Founders

Dagestan State Technical University,  
Dagestan State University,  
Don State Technical University,  
Berkbekov Kabardino-Balkarian State University,  
Kuban State Technological University,  
Rostov State Transport University,  
Rostov State University of Economics,  
Platov South Russian State Polytechnical University,  
Southern Federal University

Magazine released T.A. Vatulyan, L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, M.S. Shipitko

Signed print June 25, 2021. The publication June 28, 2021. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.  
Conv. print. sheets 16.74. Publ. sign. 18.63. Edition 250 copies. Order number 8069.

Address of Editorial Board: 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 105/42,  
SFU, journal "Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science",  
e-mail: [izvestiya@sfnu.ru](mailto:izvestiya@sfnu.ru), Web Address: [www.izvestiya.sfnu.ru](http://www.izvestiya.sfnu.ru)

Address of Editorial Board: 344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 2, room 110,  
phone +7 (863) 218-40-00 ext. 11-093; ext. 11-094.

Printed in the printing department, and corporate souvenirs,  
Publishing and printing complex KIBI MEDIA CENTER, SFU,  
344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 1, room 104, phone (863) 247-80-51

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

## BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi 10.18522/1026-2237-2021-2

*Свидетельство о регистрации*  
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,  
выдано Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций  
Научный журнал  
Издается с 1973 г.  
Периодичность серии 4 номера в год  
№ 2 (210) 2021 г.

*Registration certificate*  
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019  
issued Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology,  
and Mass Media  
Science magazine  
Published since 1973.  
4 issues per a year  
No. 2 (210) 2021

### ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

### NATURAL SCIENCE

#### СОДЕРЖАНИЕ

#### CONTENTS

##### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

##### PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Езаова А.Г., Канукоева Л.В., Кунизhev Б.И., Куповых Г.В.* Нелокальная внутренняя краевая задача для смешанного уравнения третьего порядка ..... 4
- Лутай В.Н.* Решение систем линейных алгебраических уравнений с использованием выборочной регуляризации ..... 11
- Норкин М.В.* Медленные движения кругового цилиндра в жидкости после отрывного удара ..... 16
- Пожарский Д.А.* Периодические контактные и смешанные задачи теории упругости (обзор) ..... 22
- Татаркин А.А.* О плотности многочленов в специальном пространстве целых функций экспоненциального типа 34

- Ezaova A.G., Kanukoeva L.V., Kunizhev B.I., Kupovykh G.V.* Nonlocal Internally Boundary Value Problem for a Mixed Third Order Equation ..... 4
- Lutay V.N.* Solving Systems of Linear Algebraic Equations with the Use of an Selective Regularization ..... 11
- Norkin M.V.* Slow Motions of A Circular Cylinder in a Liquid after a Separation Impact ..... 16
- Pozharskii D.A.* Periodic Contact and Mixed Problems of the Elasticity Theory (Review) ..... 22
- Tatarkin A.A.* The Density of Polynomials in a Special Space of Entire Functions of Exponential Type .... 34

##### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

##### SCIENCES OF EARTH

- Барышников Г.Я., Слажнева С.С., Максимова Н.Б., Сотников П.В.* Влияние бора на качество подземных вод в Алтайском крае ..... 42
- Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Захаров А.В., Хиллер В.В.* Акцессорная и рудная минерализация сланцев из фундамента полуострова Ямал (Западно-Яротинский участок, Западная Сибирь) ..... 49
- Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Глинка В.В., Сердюк Л.В., Чмыхов А.А.* Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки интенсивности проявления опасных береговых процессов водоохранной зоны Цимлянского водохранилища ..... 56

- Baryshnikov G.Ya., Slazhneva S.S., Maximova N.B., Sotnikov P.V.* Effect of Boron on the Groundwater Quality in Altai Region ..... 42
- Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Zakharov A.V., Khiller V.V.* Accessory and Ore Mineralization of Schists from the Basement of the Yamal Peninsula (Zapadno-Yarotinsky Area, Western Siberia) ..... 49
- Ivlieva O.V., Bepalova L.A., Glinka V.V., Serdyuk L.V., Chmykhov A.A.* The Use of Unmanned Aerial Vehicles to Assess the Intensity of Manifestation of Dangerous Coastal Processes in the Water Protection Zone of the Tsimlyansk Reservoir..... 56

<i>Крисак О.С., Попов Ю.В.</i> Минеральные ассоциации жил с кварцем типа «диаманты Донбасса» Селезневского угленосного района (складчатый Донбасс).....	66	<i>Krisak O.S., Popov Yu.V.</i> Mineral Associations of Veins with Quartz of the "Diamonds of Donbass" Type in the Seleznevsky Coal-Bearing District (Folded Donbass) .....	66
<i>Максимов Д.В., Жуликов А.А., Максимова А.Д.</i> Особенности организации и размещения игорных зон в различных странах мира .....	73	<i>Maksimov D.V., Zhulikov A.A., Maksimova A.D.</i> Features of the Organization and Location of Gambling Zones in Different Countries of the World.....	73
<i>Склярченко Г.Ю., Закруткин В.Е., Гибков Е.В.</i> Особенности взаимодействия подземных и поверхностных вод в зонах дизъюнктивных тектонических нарушений (на примере Восточного Донбасса) .....	81	<i>Sklyarenko G.Yu., Zakrutkin V.E., Gibkov E.V.</i> Peculiarities of Interaction of Underground and Surface Water in Zones of Disjunctive Tectonic Faults (on the Example of Eastern Donbass) .....	81
<i>Mansurov M.I., Galandarov B.H., Safari M.H., Karimov V.M., Karimli U.I.</i> Geochemical Features of the Distribution of Ore Elements in the Polymetal Ores of Mehmanian Deposit (Azerbaijan Part of the Lesser Caucasus).....	88	<i>Mansurov M.I., Galandarov B.H., Safari M.H., Karimov V.M., Karimli U.I.</i> Geochemical Features of the Distribution of Ore Elements in the Polymetal Ores of Mehmanian Deposit (Azerbaijan Part of the Lesser Caucasus) .....	88

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Голодная О.М., Жарикова Е.А.</i> Гранулометрический состав почв заповедника «Ханкайский» (Приморский край).....	99	<i>Golodnaya O.M., Zharikova E.A.</i> Particle-Size Distribution in Soils of the Khankaiskiy Nature Reserve (Primorye Territory).....	99
<i>Ермолаева О.Ю., Федяева В.В., Шмараева А.Н., Горовцов А.В.</i> Биологическое разнообразие растений на территории охраняемого ландшафта «Раздорские склоны» (Ростовская область).....	106	<i>Ermolaeva O.Yu., Fedyaeva V.V., Shmaraeva A.N., Gorovtsov A.V.</i> Biological Diversity of Plants in the Territory of the Protected Landscape "Razdorskije Sklony" (Rostov Region).....	106
<i>Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А.</i> Устойчивость дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> к экстремальным условиям... 113	113	<i>Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Gasanov R.Z., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A.</i> The Resistance of Yeast <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> to Extreme Conditions .. 113	113
<i>Мазрухо А.Б., Каминский Д.И., Лобанов В.В., Соков Д.В., Архангельская И.В., Ежова М.И., Левченко Д.А., Сагакянц М.М.</i> Дифференциация штаммов холерного вибриона от микроорганизмов – представителей рода <i>Aeromonas</i> с помощью питательной среды «Аргинин – железо – сахарозный агар» .....	119	<i>Mazrukho A.B., Kaminsky D.I., Lobanov V.V., Sokov D.V., Arkhangelskaya I.V., Ezhova M.I., Levchenko D.A., Sagakyants M.M.</i> Differentiation of Cholera Vibrio Strains from Microorganisms - Representatives of the Genus <i>Aeromonas</i> Using the Nutritional Medium "Arginine-Iron-Sugar Agar" .....	119
<i>Судина Л.В., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тер-Мисакянц Т.А., Неведомая Е.Н., Казеев К.Ш.</i> Оценка экотоксичности висмута по активности каталазы в зависимости от химического соединения и буферности почв .....	126	<i>Sudina L.V., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Ter-Misakyants T.A., Nevedomaya E.N., Kazeev K.Sh.</i> Estimation of Ecotoxicity of Bismuth by Catalase Activity Depending on the Chemical Compounds and Buffer Soils.....	126

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

<i>Ватульян А.О., Карякин М.И.</i> Владимир Андреевич Бабешко (к 80-летию со дня рождения) .....	134	<i>Vatulyan A.O., Karjakin M.I.</i> Vladimir Andreevich Babeshko (on the Occasion of his 80th Birthday) .....	134
--	-----	---	-----

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

<i>Ватульян А.О., Карякин М.И., Наседкин А.В., Соловьев А.Н.</i> Математическое моделирование и биомеханика в современном университете .....	137	<i>Vatulyan A.O., Karjakin M.I., Nasedkin A.V., Soloviev A.N.</i> Mathematical Modeling and Biomechanics at a Modern University.....	137
<i>Миноранский В.А.</i> Весенний праздник природы и населения степей .....	139	<i>Minoransky V.A.</i> Spring Holiday of Nature and Population of the Steppes .....	139

## ПАМЯТИ УЧЕНОГО

<i>Абанин А.В., Ватульян А.О., Ерусалимский Я.М., Карякин М.И., Кирютенко Ю.А., Климентов С.Б., Кусраев А.Г., Мальцев И.М., Мелихов С.Н., Налбандян Ю.С., Устинов Ю.А.</i> Памяти Юрия Фёдоровича Коробейника.....	142	<i>Abanin A.V., Vatulyan A.O., Erusalimsky Ya.M., Karjakin M.I., Kiryutenko Yu.A., Klimentov S.B., Kusraev A.G., Maltsev I.M., Melikhov S N., Nalbandyan Yu.S., Ustinov Yu.A.</i> In Memory of Yuri Fedorovich Korobeinik.....	142
--	-----	--	-----

## BIOLOGICAL SCIENCES

## OUR PERSONS

## SCIENTIFIC LIFE

## IN MEMORY OF THE SCIENTIST

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ****PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

УДК 517.95

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-4-10

**НЕЛОКАЛЬНАЯ ВНУТРЕННЯЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА  
ДЛЯ СМЕШАННОГО УРАВНЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА**© 2021 г. *А.Г. Езаова<sup>1</sup>, Л.В. Канукоева<sup>1</sup>, Б.И. Кунижев<sup>1</sup>, Г.В. Куповых<sup>2</sup>*<sup>1</sup>*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия,*<sup>2</sup>*Южный федеральный университет, Таганрог, Россия***NONLOCAL INTERNALLY BOUNDARY VALUE PROBLEM  
FOR A MIXED THIRD ORDER EQUATION***A.G. Ezaova<sup>1</sup>, L.V. Kanukoeva<sup>1</sup>, B.I. Kunizhev<sup>1</sup>, G.V. Kupovykh<sup>2</sup>*<sup>1</sup>*Berbekov Kabardino-Balkar State University, Nalchik, Russia,*<sup>2</sup>*Southern Federal University, Taganrog, Russia*

*Езаова Алена Георгиевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия, e-mail: alena\_ezaova@mail.ru*

*Alena G. Ezaova - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Berbekov Kabardino-Balkar State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia, e-mail: alena\_ezaova@mail.ru,*

*Канукоева Ляна Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия*

*Liana V. Kanukoeva - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Berbekov Kabardino-Balkar State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia*

*Кунижев Борис Иналович – доктор физико-математических наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, г. Нальчик, КБР, 360004, Россия*

*Boris I. Kunizhev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Berbekov Kabardino-Balkar State University, Chernyshevskogo St., 173, Nalchik, KBR, 360004, Russia*

*Куповых Геннадий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, Инженерно-технологическая академия, Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог, 347922, Россия, e-mail: kupovykh@sfsedu.ru*

*Gennady V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Academy for Engineering and Technologies, Southern Federal University, Nekrasovsky St., 44, Taganrog, 347922, Russia, e-mail: kupovykh@sfsedu.ru*

*Исследуется внутренняя краевая задача для смешанного уравнения гипербола-параболического типа с кратными характеристиками. Уравнение рассматривается в конечной односвязной области, состоящей из гиперболической и параболической частей. Краевое условие поставленной задачи в гиперболической части области содержит оператор дробного в смысле Римана – Лиувилля интегро-дифференцирования с гипергеометрической функцией Гаусса. Порядок дробной производной зависит от порядка вырождения уравнения и поточечно связан со*

значением решения и производной от него на линии вырождения. Основным результатом работы является сформулированная и доказанная теорема существования и единственности решения поставленной задачи при различных случаях дискриминанта кубического характеристического уравнения. При доказательстве единственности решения применяется метод интегралов энергии и выводятся ограничения неравенственного типа на заданные функции и порядок производной в краевом условии. Для разрешимости вопроса о существовании решения поставленная задача эквивалентно сводится к системе функциональных соотношений между следом искомого решения и производной от него, принесенных на линию вырождения из гиперболической и параболической частей смешанной области. Вопрос существования решения в каждом из рассмотренных случаев для дискриминанта кубического характеристического уравнения эквивалентно редуцирован к интегральному уравнению Фредгольма второго рода, со слабой особенностью в ядре и непрерывной правой частью, безусловная разрешимость которого следует из единственности решения поставленной задачи. Также в работе установлены эффект влияния на корректность постановки задачи порядка дробной производной в краевом условии в гиперболической части области и его связь с порядком вырождения уравнения.

**Ключевые слова:** нелокальная краевая задача, смешанный тип уравнения, уравнения третьего порядка, кратные характеристики, конечная область, единственность, метод интегралов энергии, существование, эквивалентная редукция, дробная производная, регулярное решение.

*The paper considers an internal boundary value problem for a mixed equation of hyperbolic-parabolic type with multiple characteristics. The equation is considered in a finite simply connected domain consisting of a hyperbolic and a parabolic part. The boundary condition of the posed problem, in the hyperbolic part of the considered domain, contains the operator of fractional, in the sense of Riemann-Liouville, integro-differentiation with a Gaussian hypergeometric function. The order of the fractional derivative depends on the order of degeneration of the equation and is point wise related to the value of the solution and its derivative on the degeneration line. The main result of the work is the formulated and proved theorem on the existence and uniqueness of the solution to the problem posed for different cases of the discriminant of the cubic characteristic equation. In the proof of the uniqueness of the solution, the method of energy integrals is used and inequality constraints are derived on the given functions and the order of the derivative in the boundary condition. For the solvability of the question of the existence of a solution, the problem posed is equivalently reduced to a system of functional relations between the trace of the desired solution and its derivative brought to the line of degeneration from the hyperbolic and parabolic parts of the mixed domain. The question of the existence of a solution, in each of the considered cases for the discriminant of the cubic characteristic equation, is equivalently reduced to the Fredholm integral equation of the second kind, with a weak singularity in the kernel and a continuous right-hand side, the unconditional solvability of which follows from the uniqueness of the solution to the problem posed. Also in the work the effect of influence on the correctness of the problem statement of the order of the fractional derivative in the boundary condition in the hyperbolic part of the domain and its connection with the order of degeneration of the equation is established.*

**Keywords:** nonlocal boundary value problem, mixed type of equation, third order equations, multiple characteristics, end area, uniqueness, energy integrals method, existence, equivalent reduction, fractional derivative, regular solution.

## Введение

Теория краевых задач для уравнений смешанного типа является одним из важнейших разделов современной теории дифференциальных уравнений с частными производными. Интерес к исследованию таких уравнений обусловлен тем, что в последние несколько десятилетий модели дробного порядка оказались более эффективными, чем модели целочисленного порядка, для некоторых реальных мировых проблем. Одним из важнейших преимуществ дифференциальных уравнений с дробной производной по сравнению с классическими дифференциальными уравнениями является то, что дробные производные дают более точные результаты при описании памяти и наследственных свойств различных материалов и процессов. Уравнения смешанного типа с дробными

производными возникают при решении прикладных задач околосвуковой газовой динамики, математической физики, биологии. В частности, многие математические модели тепло- и массообмена в средах, окруженных пористой средой, сводятся к краевым задачам для уравнений смешанного типа.

Необходимость рассмотрения уравнений гиперболо-параболического типа возникла при рассмотрении задач, связанных с движением газа в канале, окруженном пористой средой. В канале движение описывается волновым уравнением, вне его – уравнением диффузии. Смешанные гиперболо-параболические уравнения лежат в основе математических моделей различных природных явлений. Локальные и нелокальные задачи для уравнений смешанного типа встречаются при математическом моделировании нефтяных пластов, фильтрации

грунтовых вод, переноса тепла и массы в объекте, имеющем сложное строение, электрических колебаний в проводах, движения жидкости в канале, окруженном пористой средой, и других явлений. В настоящее время исследования нелокальных задач для уравнений смешанного типа ведутся интенсивно. В опубликованных работах краевые условия содержат классические операторы или операторы дробного в смысле Римана – Лиувилля интегро-дифференцирования.

Краевые задачи для уравнений смешанного типа с кратными характеристиками возникают при изучении распространения нелинейных волн в слабодиспергирующих средах. Исследованию задач для различных типов вырождающихся уравнений и уравнений смешанного типа посвящены работы [1–9].

В [2, 3] рассматриваются нелокальные краевые задачи для вырождающихся гиперболических уравнений с дробной производной в краевом условии. В этих работах найдены промежутки изменения порядка дробной производной, при которых поставленная задача однозначно и неоднозначно разрешима. В [4–6, 10–14] исследованы вопросы однозначной разрешимости задач для различных типов смешанных уравнений.

В данной статье рассматривается смешанное гипербола-параболическое уравнение третьего порядка с обобщенным оператором дробного интегро-дифференцирования в смысле Римана – Лиувилля в краевом условии. Однозначная разрешимость поставленной задачи доказывается путем её редукции к интегральному уравнению Фредгольма второго рода.

### Постановка задачи

В евклидовой плоскости независимых переменных  $x$  и  $y$  рассмотрим уравнение

$$0 = \begin{cases} U_{xxx} - U_y + a_1(x, y)U_x + a_0(x, y)U, & y > 0, \\ (-y)^m U_{xx} - U_{yy}, & y < 0, \end{cases} \quad (1)$$

в конечной односвязной области  $\Omega$ , ограниченной отрезками  $AA_0, A_0B_0, B_0B$  прямых  $x = 0, y = 1, x = 1$  при  $y > 0$ , характеристиками

$$AC: x - \frac{2}{2m+1}(-y)^{\frac{2m+1}{2}} = 0,$$

$$BC: x + \frac{2}{2m+1}(-y)^{\frac{2m+1}{2}} = 1$$

уравнения (1) при  $y < 0$  и отрезком  $I \equiv AB = (0, 1)$  прямой  $y = 0$ , где  $m$  – натуральное число.

Обозначим через  $\Omega^+$  полуплоскость  $y > 0$  и  $\Omega^-$  полуплоскость  $y < 0$  области  $\Omega$ ;  $\Theta(x)$  – точка пересечения характеристики уравнения (1), выходящей из точки  $(x, 0)$ , с характеристикой АС.

**Задача.** Найти функцию  $U(x, y)$ , принадлежащую классу

$$U(x, y) \in C(\bar{\Omega}) \cap C^1(\Omega) \cap C_{x,y}^{3,1}(\Omega^+) \cap C_{x,y}^{2,2}(\Omega^-),$$

являющуюся регулярным в  $\Omega^+ \cup \Omega^-$  решением уравнения (1) и удовлетворяющую краевым условиям

$$U(0, y) = \varphi_1(y), U(1, y) = \varphi_2(y), U_x(0, y) = \varphi_3(y), \quad (2)$$

$$0 \leq y \leq 1,$$

$$\alpha(x) D_{0x}^a \delta(x) U[\Theta(x)] + \gamma(x) U(x, 0) + c(x) U_y(x, 0) = f(x), \quad \forall x \in I, \quad (3)$$

где  $\varphi_i(y) \in C[0, 1] \cap C^2]0, 1[$ ,  $i = \overline{1, 3}$ ;

$$\alpha(x), \gamma(x), c(x), f(x) \in C^1(I) \cap C^3(I),$$

причем  $\alpha^2(x) + \gamma^2(x) + c^2(x) \neq 0$ ,  $a$  – вещественное число;  $D_{0x}^l$  – оператор дробного в смысле Римана – Лиувилля интегро-дифференцирования.

Сформулированная задача относится к классу нелокальных задач со смещением А.М. Нахушева [1].

### Основные результаты

Пусть  $U(x, 0) = \tau(x)$  – след искомого решения, а  $U_y(x, 0) = \nu(x)$  – след производной искомого решения на линии вырождения  $y = 0$ . Тогда решение задачи Коши в области  $\Omega^-$  имеет вид [15]

$$U(x, y) = \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma^2(\varepsilon)} \times$$

$$\times \int_0^1 \tau \left[ x + \frac{2}{m+2}(-y)^{\frac{m+2}{2}}(2t-1) \right] [t(1-t)]^{\varepsilon-1} dt +$$

$$+ \frac{\Gamma(2-2\varepsilon)}{\Gamma^2(1-\varepsilon)} y \int_0^1 \nu \left[ x + \frac{2}{m+2}(-y)^{\frac{m+2}{2}}(2t-1) \right] [t(1-t)]^{-\varepsilon} dt,$$

где  $\varepsilon = m/(2m+4)$ ;  $\Gamma(z)$  – гамма-функция Эйлера [16].

$$\text{С учетом выражения } \Theta(x) = \frac{x}{2} - i \left[ \frac{m+2}{4} x \right]^{\frac{2}{m+2}}$$

в последнем равенстве получим

$$U[\Theta_0(x)] = \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon)} x^{1-2\varepsilon} D_{0x}^{-\varepsilon} x^{\varepsilon-1} \tau(x) -$$

$$- \frac{\Gamma(2-2\varepsilon)}{\Gamma(1-\varepsilon)} \left( \frac{m+2}{4} \right)^{1-2\varepsilon} D_{0x}^{\varepsilon-1} x^{-\varepsilon} \nu(x).$$

**Теорема.** В области  $\Omega$  существует единственное решение задачи (1)–(3) при выполнении следующих условий:

$$a_{1x}(x, y) - 2a_0(x, y) \geq 0, \quad a_i(x, y) \in C^i(\bar{\Omega}^+), \quad (4)$$

и либо

$$a = \varepsilon, \delta(x) = x^{2\varepsilon-1}, \quad (5)$$

$$\alpha(x) = x^{1-\varepsilon} \alpha_*(x), \quad \alpha_*(x) \in C^1(\bar{I}),$$

$$A_1(x) = \alpha_*(x) + \frac{\Gamma(\varepsilon)}{\Gamma(2\varepsilon)} \gamma(x) \neq 0, \quad \forall x \in \bar{I}, \quad (6)$$

$$\left[ \frac{\alpha_*(x)}{A_1(x)} \right]' \leq 0, \quad \frac{c(x)}{A_1(x)} \leq 0, \quad \forall x \in \bar{I}; \quad (7)$$

либо

$$a = 1 - \varepsilon, \quad \delta(x) = 1, \quad (8)$$

$$A_2(x) = (1-x)^\varepsilon \alpha(x) - \frac{1}{k} x^\varepsilon (1-x)^\varepsilon c(x) \neq 0, \quad (9)$$

$\forall x \in \bar{I}$ ,

$$\left[ \frac{(1-x)^\varepsilon \alpha(x)}{A_2(x)} \right]' \leq 0, \quad \frac{\gamma(x)}{A_2(x)} \geq 0, \quad \forall x \in \bar{I}, \quad (10)$$

где  $k = \frac{\Gamma(2-2\varepsilon)}{\Gamma(1-\varepsilon)} \left( \frac{m+2}{4} \right)^{1-2\varepsilon}$ .

*Доказательство единственности.* Продемонстрируем выполнение условий (5)–(7) сформулированной выше теоремы существования и единственности решения поставленной задачи. Рассмотрим уравнение (1) при  $y < 0$ . Пусть выполняются условия (5). Тогда, подставляя значение  $U[\Theta(x)]$  в краевое условие (3), учитывая тождество  $D_{0x}^\varepsilon D_{0x}^{-\varepsilon} = D^0$ , где  $D^0$  – единичный оператор, получим [17]

$$\left[ \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon)} \alpha(x) x^{\varepsilon-1} + \gamma(x) \right] \tau(x) - \frac{\Gamma(2-2\varepsilon)}{\Gamma(1-\varepsilon)} \left( \frac{m+2}{4} \right)^{1-2\varepsilon} \alpha(x) D_{0x}^\varepsilon x^{2\varepsilon-1} D_{0x}^{\varepsilon-1} x^{-\varepsilon} \nu(x) + c(x) \nu(x) = f(x). \quad (11)$$

Рассмотрим двойной интеграл в выражении (11) [1, 4, 15]:

$$I_1 = D_{0x}^\varepsilon x^{2\varepsilon-1} D_{0x}^{\varepsilon-1} x^{-\varepsilon} \nu(x) = \frac{1}{\Gamma^2(1-\varepsilon)} \frac{d}{dx} \int_0^x \xi^{-\varepsilon} \nu(\xi) d\xi \int_\xi^x \frac{t^{2\varepsilon-1} dt}{(x-t)^\varepsilon (t-\xi)^\varepsilon}.$$

Произведя замену переменной интегрирования  $t = (x-\xi)z + \xi$  и проделав несложные преобразования, с учетом свойств гипергеометрической

функции [16] приходим к выражению для двойного интеграла в виде

$$I_1 = \frac{1-2\varepsilon}{\Gamma(2-2\varepsilon)} \int_0^x \xi^{-\varepsilon} \left( \frac{x-\xi}{x} \right)^{-2\varepsilon} \frac{\xi}{x^2} \left( 1 - \frac{x-\xi}{x} \right)^{\varepsilon-1} \nu(\xi) d\xi = \frac{x^{\varepsilon-1}}{\Gamma(1-2\varepsilon)} \int_0^x \frac{\nu(\xi) d\xi}{(x-\xi)^{2\varepsilon}} = x^{\varepsilon-1} D_{0x}^{2\varepsilon-1} \nu(x). \quad (12)$$

С учетом условия (6) и полученного выражения (12) уравнение (11) переписывается в виде

$$\tau(x) = \alpha_1(x) D_{0x}^{2\varepsilon-1} \nu(x) + \gamma_1(x) \nu(x) + f_1(x), \quad (13)$$

где  $\alpha_1(x) = \frac{k_1 \alpha_*(x)}{A_1(x)}$ ,  $\gamma_1(x) = -\frac{\Gamma(\varepsilon)}{\Gamma(2\varepsilon)} \frac{c(x)}{A_1(x)}$ ,

$$f_1(x) = \frac{\Gamma(\varepsilon)}{\Gamma(2\varepsilon)} \frac{f(x)}{A_1(x)},$$

$$k_1 = \frac{\Gamma(2-2\varepsilon)}{\Gamma(1-\varepsilon)} \frac{\Gamma(\varepsilon)}{\Gamma(2\varepsilon)} \left( \frac{m+2}{4} \right)^{1-2\varepsilon}.$$

Выражение (13) является основным функциональным соотношением между функциями  $\tau(x)$  и  $\nu(x)$ , принесенным на линию  $y = 0$  из области  $\Omega^-$ .

Рассмотрим однородное уравнение (13) при  $f(x) = 0$ . Умножим его на  $\nu(x)$  и проинтегрируем от 0 до 1. Получим

$$I^* = \int_0^1 \alpha_1(x) \nu(x) D_{0x}^{2\varepsilon-1} \nu(x) dx + \int_0^1 \gamma_1(x) \nu^2(x) dx = \frac{1}{\Gamma(1-2\varepsilon)} \int_0^1 \alpha_1(x) \nu(x) dx \int_0^x \frac{\nu(t) dt}{(x-t)^{2\varepsilon}} + \int_0^1 \gamma_1(x) \nu^2(x) dx.$$

Воспользовавшись формулой для функции  $\Gamma(\mu)$  [16]  $\int_0^\infty t^{\mu-1} \text{cost} k dt = \frac{\Gamma(\mu)}{k^\mu} \cos \frac{\pi\mu}{2}$ ,  $k > 0$ ,  $0 < \mu < 1$ , и применяя формулу интегрирования по частям, с учетом  $\alpha_1(1) = 0$  получим

$$\frac{\pi}{\sin \pi\varepsilon} I^* = - \int_0^\infty t^{2\varepsilon-1} dt \times \left[ \int_0^1 \alpha_1'(x) \left[ \left( \int_0^x \nu(\xi) \text{cost} \xi d\xi \right)^2 + \left( \int_0^x \nu(\xi) \sin t \xi d\xi \right)^2 \right] dx + \frac{2}{\pi} \sin \pi\varepsilon \int_0^1 \gamma_1(x) \nu^2(x) dx. \quad (14)$$

Отсюда видно, что  $I^* \geq 0$ .

Рассмотрим уравнение (1) при  $y > 0$ . Переходя в уравнении (1) к пределу при  $y \rightarrow +0$ , будем иметь  $\tau'''(x) + a_1(x, 0) \tau'(x) + a_0(x, 0) \tau(x) = \nu(x)$ . (15)

При условии рассмотрения однородных граничных условий  $\varphi_i(y) = 0$ ,  $i = \overline{1,3}$ , умножим последнее равенство на  $\tau(x)$  и проинтегрируем от 0 до 1. Применяя формулу интегрирования по частям и проделав несложные преобразования, получим

$$I^* = \int_0^1 \tau(x) \nu(x) dx = \left[ \frac{1}{2} \tau'^2(1) + \frac{1}{2} \int_0^1 (a_{1x}(x,0) - 2a_0(x,0)) \tau^2(x) dx \right]. \quad (16)$$

С учетом выполнения условий (4) можно сделать вывод, что  $I^* \geq 0$ . Так как, с одной стороны,  $I^* \geq 0$ , с другой –  $I^* \leq 0$ , получаем, что  $I^* = 0$ . Следовательно, левая часть выражения (14) равна нулю. Учитывая, что слагаемые справа неотрицательны, получаем, что они также равны нулю.

Так как  $t^{2\varepsilon-1} \geq 0$ , то  $\int_0^x \nu(\xi) \cos t \xi d\xi = 0$ ,

$\int_0^x \nu(\xi) \sin t \xi d\xi = 0$  для всех  $t \in (0, \infty)$ , в частности,

при  $t = 2\pi k$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . При этих значениях  $t$  функции  $\cos t \xi$  и  $\sin t \xi$  образуют полную ортогональную систему функций в  $L^2$ .

Следовательно,  $\nu(\xi) = 0$  почти всюду, а с учетом непрерывности функции  $\nu(x)$  получаем  $\nu(\xi) = 0$  всюду. Отсюда видно, что  $\nu(x) = 0$ . Учитывая это, заключаем, что  $\tau(x) = 0$ .

Таким образом,  $U(x, y) \equiv 0$  в  $\Omega^-$  как решение задачи Коши с нулевыми данными, а в  $\Omega^+$  – как решение задачи (1),  $\tau(x) = 0$ ,  $U(0, y) = 0$ ,  $U(1, y) = 0$ ,  $U_x(0, y) = 0$  [6]. Отсюда заключаем, что решение задачи (1)–(3) единственно.

*Доказательство существования.* Рассмотрим

уравнение (1) в области  $\Omega^+$ . Получаем задачу (15)  
 $\tau(0) = \varphi_1(0)$ ,  $\tau(1) = \varphi_2(0)$ ,  $\tau'(0) = \varphi_3(0)$ . (17)

Пусть  $a_1(x, 0) = s_1$ ,  $a_0(x, 0) = s_0$ ,  $s_1, s_0 = \text{const} \neq 0$ . Будем искать неизвестную функцию  $\tau(x)$  в виде суммы

$$\tau(x) = z(x) + g(x), \quad (18)$$

где  $g(x) = (1-x^2)\varphi_1(0) + x^2\varphi_2(0) + (x-x^2)\varphi_3(0)$ . С учетом граничных условий (17) приходим к задаче относительно новой неизвестной функции  $z(x)$  вида

$$z'''(x) + s_1 z'(x) + s_0 z(x) = f_2(x), \quad (19)$$

$$z(0) = 0, z(1) = 0, z'(0) = 0, \quad (20)$$

где  $f_2(x) = \nu(x) - s_1 g'(x) - s_0 g(x)$ .

Правую часть равенства (19) пока будем считать известной. Решение полученной задачи (19), (20) относительно  $z(x)$  существенно зависит от корней характеристического уравнения [18, 19]

$$k^3 + s_1 k + s_0 = 0, \quad (21)$$

которое соответствует однородному уравнению

$$z'''(x) + s_1 z'(x) + s_0 z(x) = 0. \quad (22)$$

Обозначим [20]

$$p = \frac{s_0^2}{4} + \frac{s_1^3}{27}. \quad (23)$$

Пусть  $p > 0$ . Тогда общее решение уравнения (22) принимает вид

$$z(x) = c_1 e^{2\bar{a}x} + c_2 e^{-\bar{a}x} \cos b\sqrt{3}x + c_3 e^{-\bar{a}x} \sin b\sqrt{3}x, \quad (24)$$

где  $\bar{a} = \frac{h_1 + h_2}{2}$ ,  $b = \frac{h_1 - h_2}{2}$ ,  $h_1 = \sqrt[3]{-\frac{s_0}{2} + \sqrt{p}}$ ,

$$h_2 = \sqrt[3]{-\frac{s_0}{2} - \sqrt{p}}.$$

Считая, что

$$\Delta = h_1 \cos\left(\frac{\pi}{3} - b\sqrt{3}\right) - h_2 \sin\left(\frac{\pi}{6} - b\sqrt{3}\right) - be^{3\bar{a}} \neq 0,$$

решение задачи (19), (20) можно записать в виде

$$z(x) = \int_0^1 G(x, t) f_2(t) dt, \quad (25)$$

где  $G(x, t) = \begin{cases} w_2(x)w_1(t), & 0 \leq x < t, \\ w_2(x)w_1(t) + w_2(x-t) / (3\sqrt{3}), & t < x \leq 1, \end{cases}$

$$w_1(t) = \frac{m}{\Delta} \left[ be^{\bar{a}(3-2t)} - \right.$$

$$\left. - e^{\bar{a}t} \left( h_1 \cos\left(\frac{\pi}{3} + b\sqrt{3}(t-1)\right) - h_2 \sin\left(\frac{\pi}{6} + b\sqrt{3}(t-1)\right) \right) \right],$$

$$w_2(x) = -be^{2\bar{a}x} +$$

$$+ e^{-\bar{a}x} \left( h_1 \cos\left(\frac{\pi}{3} - b\sqrt{3}x\right) - h_2 \sin\left(\frac{\pi}{6} - b\sqrt{3}x\right) \right),$$

$G(x, t)$  – функция Грина задачи (17), (18).

Учитывая (25) в выражении (19), получим решение задачи (15), (17) в виде

$$\tau(x) = \int_0^1 G(x, t) \nu(t) dt + \tilde{f}(x), \quad (26)$$

где  $\tilde{f}(x) = g(x) - s_1 \int_0^1 G(x, t) g'(t) dt - s_0 \int_0^1 G(x, t) g(t) dt$ .

Исключая из системы (13) и (26) функцию  $\tau(x)$ ,

с учетом условия (6) получим

$$v(x) + \int_0^1 \frac{K_1(x,t)v(t)dt}{|x-t|^{2\varepsilon}} = F_1(x), \quad (27)$$

где

$$K_1(x,t) = \begin{cases} -\frac{c_1}{\Gamma(1-2\varepsilon)} \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon)} \frac{\alpha_*(x)}{c(x)} + \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon)} \frac{A_1(x)}{c(x)} G(x,t)(x-t)^{2\varepsilon}, & 0 \leq t \leq x, \\ \frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon)} \frac{A_1(x)}{c(x)} G(x,t)(t-x)^{2\varepsilon}, & x \leq t \leq 1, \end{cases}$$

$$F_1(x) = -\frac{\Gamma(2\varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon)} \left[ \frac{A_1(x)}{c(x)} g(x) - s_1 \frac{A_1(x)}{c(x)} \int_0^1 G(x,\xi) g'(\xi) d\xi - s_0 \frac{A_1(x)}{c(x)} \int_0^1 G(x,\xi) g(\xi) d\xi - \frac{\Gamma(\varepsilon)}{\Gamma(2\varepsilon)} \frac{f(x)}{c(x)} \right].$$

При  $\gamma_1(x) \neq 0$  ( $c(x) \neq 0$ ) уравнение (27) есть интегральное уравнение Фредгольма второго рода со слабой особенностью в ядре и непрерывной правой частью. Его безусловная разрешимость следует из единственности решения задачи.

По найденному  $v(x)$  из (13) определяется  $\tau(x)$ ,

решение задачи (1)–(3) в области  $\Omega^-$  – как решение задачи Коши, а в области  $\Omega^+$  решение задачи определяется по формуле [1]

$$U(x,y) = \int_0^y G_{\xi\xi}(x,y;0,\eta) \varphi_1(\eta) d\eta - \int_0^y G_{\xi\xi}(x,y;1,\eta) \varphi_2(\eta) d\eta - \int_0^y G_{\xi}(x,y;0,\eta) \varphi_3(\eta) d\eta + \int_0^1 G(x,y;\xi,0) \tau(\xi) d\xi,$$

где  $G(x,y;\xi,\eta)$  – функция Грина задачи (1), (2),

$$U(x,0) = \tau(x).$$

Аналогично предыдущему случаю рассматриваются случаи  $p = 0$ ,  $p < 0$ . Поставленная задача также сводится к интегральному уравнению Фредгольма второго рода относительно функции  $v(x)$ , со слабой особенностью в ядре и непрерывной правой частью.

Доказательство единственности и существования решения задачи при выполнении условий (8)–(10) теоремы единственности проводится аналогично.

## Заключение

Исследована нелокальная внутренняя краевая задача со смещением для смешанного уравнения гиперболо-параболического типа третьего порядка с кратными характеристиками, краевое условие которой содержит оператор дробного интегро-дифференцирования в смысле Римана – Лиувилля в гиперболической части области. Найдены необходимые и достаточные условия существования и единственности решения поставленной задачи.

С применением метода интегралов энергии вводятся определенные ограничения неравенственно-го типа на известные функции, при которых решение поставленной задачи единственно. Для доказательства существования решения поставленной задачи рассматривается система двух уравнений, составленная из функциональных соотношений между следом искомой функции и производной от него, принесённых на линию вырождения из параболической и гиперболической частей смешанной области. При выполнении условий теоремы единственности задача эквивалентно редуцирована к интегральному уравнению Фредгольма второго рода относительно следа производной искомого решения, безусловная разрешимость которого следует из единственности решения поставленной задачи.

## Литература

1. *Нахушев А.М.* Задачи со смещением для уравнений в частных производных. М.: Наука, 2006. 287 с.
2. *Repin O.A., Kumykova S.K.* A problem with generalized fractional integro-differentiation operators of arbitrary order // Russian Mathematics. 2012. Vol. 56, № 12. P. 50–60.
3. *Repin O.A., Kumykova S.K.* Boundary-value problem with Saigo operators for mixed type equation of the third order with multiple characteristics // Russian Mathematics. 2015. Vol. 59, № 7. P. 44–51.
4. *Езаова А.Г.* Задача с нелокальными условиями на характеристиках для смешанного уравнения третьего порядка // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2009. № 3. С. 14–17.
5. *Езаова А.Г.* Об одной нелокальной задаче для уравнения смешанного типа третьего порядка // Изв. КБГУ. 2011. Т. 1, № 4. С. 26–31.
6. *Джурраев Т.Д., Сопуев А., Мамаджанов М.* Краевые задачи для уравнений парабола-гиперболического типа. Ташкент: Фан, 1986. 237 с.
7. *Смирнов М.М.* Вырождающиеся эллиптические и гиперболические уравнения. М.: Наука, 1966. 292 с.
8. *Смирнов М.М.* Уравнения смешанного типа. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
9. *Маричев О.И., Килбас А.А., Репин О.А.* Краевые задачи для уравнений с частными производными с раз-

ривными коэффициентами. Самара: Изд-во Самарского гос. экон. ун-та, 2008. 275 с.

10. Utkina E.A. Boundary value problems for a third-order hyperbolic equation on the plane // *Differential Equations*. 2017. Vol. 53, № 6. P. 818–824.

11. Korzyuk V.I., Mandrik A.A. Classical solution of the first mixed problem for a third-order hyperbolic equation with the wave operator // *Differential Equations*. 2014. Vol. 50, № 4. P. 489–501.

12. Repin O.A. О нелокальной краевой задаче с оператором М. Сайго для обобщенного уравнения Эйлера – Пуассона – Дарбу // *Интегральные преобразования и краевые задачи: сб. науч. тр. / Ин-т математики Украины. Черновцы, 1996. Вып. 13. С. 175–181.*

13. Кумыкова С.К. Об одной задаче с нелокальными краевыми условиями на характеристиках для уравнения смешанного типа // *Диф. уравнения*. 1974. Т. 10, № 1. С. 78–88.

14. Сопуев А., Кожабеков К.Г. Краевые задачи для уравнений смешанного парабола-гиперболического типа третьего порядка с младшими членами с характеристической линией изменения типа // *Дифференциальные уравнения с частными производными и родственные проблемы анализа и информатики: тр. Междунар. науч. конф. Ташкент, 2004. Т. 1. С. 14–16.*

15. Бицадзе А.В. Некоторые классы уравнений в частных производных. М.: Наука, 1981. 448 с.

16. Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложения. М.: Гос. изд-во техн лит-ры, 1953. 379 с.

17. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.

18. Нахушев А.М. Уравнения математической биологии. М.: Высшая школа, 1995. 301 с.

19. Матвеев В.Н. Дифференциальные уравнения. М.: Высшая школа, 1967. 565 с.

20. Фаддеев Д.К. Лекции по алгебре. М.: Физматлит, 1984. 416 с.

#### References

1. Nakhushev A.M. (2006). *Problems with displacement for partial differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 287 p. (in Russian).

2. Repin O. A., Kumykova. S. K. (2012). A problem with generalized fractional integro-differentiation operators of arbitrary order. *Russian Mathematics*, vol. 56, No. 12, pp. 50-60.

3. Repin O. A., Kumykova S. K. (2015). Boundary-value problem with Saigo operators for mixed type equation of the third order with multiple characteristics. *Russian Mathematics*, vol. 59, No. 7, pp. 44-51.

4. Ezaova A.G. (2009). Problem with nonlocal conditions on characteristics for a mixed third-order equation. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of*

*Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 3, pp. 14-17. (in Russian).

5. Ezaova A.G. (2011). On a nonlocal problem for a third-order mixed-type equation. *Izv. KBGU*, vol. 1, No. 4, pp. 26-31. (in Russian).

6. Dzhuraev T.D., Sopuev A., Mamadzhanov M. (1986). *Boundary value problems for equations of parabolic-hyperbolic type*. Tashkent, Fan Publ., 237 p. (in Russian).

7. Smirnov M.M. (1966). *Degenerate elliptic and hyperbolic equations*. Moscow, Nauka Publ., 292 p. (in Russian).

8. Smirnov M.M. (1985). *Mixed type equations*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 304 p. (in Russian).

9. Marichev O.I., Kilbas A.A., Repin O.A. (2008). *Boundary value problems for partial differential equations with discontinuous coefficients*. Samara, Samara State University of Economics Press, 275 p. (in Russian).

10. Utkina E.A. (2017). Boundary value problems for a third-order hyperbolic equation on the plane. *Differential Equations*, vol. 53, No. 6, pp. 818-824.

11. Korzyuk V.I., Mandrik A.A. (2014). Classical solution of the first mixed problem for a third-order hyperbolic equation with the wave operator. *Differential Equations*, vol. 50, No. 4, pp. 489-501.

12. Repin O.A. (1996). On a nonlocal boundary value problem with M. Saigo's operator for the generalized Euler-Poisson-Darboux equation. *Integral transformations and boundary value problems*. Collection of Scientific Articles. Institute of Mathematics of Ukraine. Chernivtsi, iss. 13, pp. 175-181. (in Russian).

13. Kumykova S.K. (1974). On a problem with nonlocal boundary conditions on characteristics for an equation of mixed type. *Dif. uravneniya*. vol. 10, No. 1, pp. 78-88. (in Russian).

14. Sopuev A., Kozhabekov K.G. (2004). Boundary value problems for equations of mixed parabolic-hyperbolic type of the third order with lower-order terms with a characteristic line of type change. *Partial Differential Equations and Related Problems of Analysis and Informatics*. Proceedings of the International Scientific Conference. Tashkent, vol. 1, pp. 14-16. (in Russian).

15. Bitsadze A.V. (1981). *Some classes of partial differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 448 p. (in Russian).

16. Lebedev N.N. (1953). *Special functions and their applications*. Moscow, State Publishing House of Technical Literature, 379 p. (in Russian).

17. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. (1987). *Integrals and derivatives of fractional order and some of their applications*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 688 p. (in Russian).

18. Nakhushev A.M. (1995). *Equations of mathematical biology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 301 p. (in Russian).

19. Matveev V.N. (1967). *Differential equations*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 565 p. (in Russian).

20. Faddeev D.K. (1984). *Lectures on algebra*. Moscow, Fizmatlit Publ., 416 p. (in Russian).

УДК 519.612

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-11-15

## РЕШЕНИЕ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫБОРОЧНОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

© 2021 г. В.Н. Лутай<sup>1</sup><sup>1</sup>Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

## SOLVING SYSTEMS OF LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS WITH THE USE OF AN SELECTIVE REGULARIZATION

V.N. Lutay<sup>1</sup><sup>1</sup>Southern Federal University, Taganrog, Russia

Лутай Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ, Инженерно-технологическая академия, Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, 44, г. Таганрог, 347922, Россия, e-mail: vnlutay@sfedu.ru

Vladimir N. Lutay - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematical Support and Computer Applications, Academy for Engineering and Technologies, Southern Federal University, Nekrasovsky Lane, 44, Taganrog, 347922, Russia, e-mail: vnlutay@sfedu.ru

Рассматривается решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), матрицы которых могут быть плохо обусловленными или неполного ранга. Обосновывается представление матрицы СЛАУ в виде произведения двух матриц, одна из которых отличается от исходной увеличенными значениями некоторых диагональных элементов. В качестве метода решения используется разложение исходной матрицы на треугольные составляющие по Гауссу или Холецкому с дополнительной операцией, которая заключается в увеличении минимальных (положительно определенных матрицы) или нулевых (сингулярные матрицы) диагональных членов треугольных матриц в процессе разложения. Для положительно определенного случая обсуждается стратегия выбора наименьшего диагонального члена в сочетании с общепринятым при решении СЛАУ выбором главного элемента. В случае сингулярных матриц добавление к 0 некоторого числа позволяет закончить процесс треугольного разложения и представить исходную матрицу в виде произведения двух матриц того же ранга. Показано, что если ранг исходной матрицы меньше размерности на единицу, то для её псевдоинверсии целесообразно использовать алгоритм Гревилля. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

**Ключевые слова:** плохо обусловленные матрицы, матрицы неполного ранга, треугольное разложение, увеличение диагональных членов, псевдообратная матрица.

The solution of systems of linear algebraic equations, which matrices can be poorly conditioned or singular is considered. As a solution method, the original matrix is decomposed into triangular components by Gauss or Cholesky with an additional operation, which consists in increasing the small or zero diagonal terms of triangular matrices during the decomposition process. In the first case, the scalar products calculated during decomposition are divided into two positive numbers such that the first is greater than the second, and their sum is equal to the original one. In further operations, the first number replaces the scalar product, as a result of which the value of the diagonal term increases, and the second number is stored and used after the decomposition process is completed to correct the result of calculations. This operation increases the diagonal elements of triangular matrices and prevents the appearance of very small numbers in the Gauss method and a negative root expression in the Cholesky method. If the matrix is singular, then the calculated diagonal element is zero, and an arbitrary positive number is added to it. This allows you to complete the decomposition process and calculate the pseudo-inverse matrix using the Greville method. The results of computational experiments are presented.

**Keywords:** ill-conditioned matrices, matrices of incomplete rank, triangular decomposition, increase of diagonal terms, pseudo-inverse matrix.

## Введение

Широко известным методом повышения устойчивости решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с плохо обусловленной и особенной матрицей является регуляризация по Тихонову [1], которая предлагает добавлять ко всем диагональным членам симметричной матрицы

$$\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n} \text{ в системе} \quad \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (1)$$

положительное число  $\lambda$ , значение которого выбирается по некоторым дополнительным соображениям. Решение СЛАУ

$$(\mathbf{A} + \lambda \mathbf{I})\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (2)$$

с матрицей, которая становится неособенной или лучше обусловленной, чем исходная, является наилучшим псевдорешением.

В основе предлагаемого метода лежит модификация LU-разложения матрицы  $\mathbf{A}$  или ее разложения по Холецкому, которая заключается в увеличении диагональных членов треугольной матрицы, вычисляемых в процессе разложения, на некоторую положительную величину. В [2] показано, что такая модификация треугольного разложения соответствует решению СЛАУ вида  $(\mathbf{A} + \mathbf{E})\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{b}$ , где  $\mathbf{E}$  – квадратная матрица  $n$ -го порядка, у которой ненулевыми являются  $k$  ( $k < n$ ) диагональных членов, индексы которых совпадают с индексами увеличенных диагональных членов треугольных матриц, причем величина  $e_{ii}$  соответствует значению, на которое увеличивается  $a_{ii}$ . Количество  $e_{ii}$  определяется в процессе разложения. Таким образом, в отличие от (2) увеличиваются не все диагональные коэффициенты  $\mathbf{A}$ , а значения  $e_{ii}$  для разных  $i$  могут быть различными.

Точное решение (1) может быть получено при решении двух систем

$$\mathbf{M}\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{Z}\mathbf{x} = \tilde{\mathbf{x}}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{M} = \mathbf{A} + \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{Z} = (\mathbf{I} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E})$ .

Матрица  $\mathbf{Z}$  имеет следующий вид:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{11} & \dots & -y_{1k} \\ 0 & 1 & -y_{21} & \dots & -y_{2k} \\ 0 & 0 & 1 - y_{31} & \dots & -y_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & -y_{n1} & \dots & 1 - y_{nk} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Столбцы  $\mathbf{y}_i$  могут быть получены при решении систем ЛАУ

$$\mathbf{M}\mathbf{y}_i = \mathbf{e}_i, \quad i \in [1, k], \quad (5)$$

где  $\mathbf{e}_i$  – столбец матрицы  $\mathbf{E}$ , у которого есть ненулевой элемент.

Так как предполагается, что треугольные матрицы уже получены, то для решения (5) достаточно

$k$  раз использовать обратную подстановку в соответствующих алгоритмах.

Количество дополнительных операций, необходимых для решения системы с дополнительной операцией, зависит от  $k$  и оценивается в [2] при максимально возможном  $k=n-1$ , не большим, чем стандартное разложение.

Ниже приведены выражения из [3] для решения системы (1) с положительно определенной матрицей по Холецкому (6) и LU-разложением (7) (опущены формулы для вычисления недиагональных членов треугольных матриц)

$$\mathbf{H}\mathbf{H}^T = \mathbf{A}, \quad h_{ii} = (a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} h_{ik}^2)^{\frac{1}{2}}, \quad i \in [2, n], \quad \mathbf{H}\mathbf{z} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{L}^T\mathbf{x} = \mathbf{z}, \quad (6)$$

$$\mathbf{L}\mathbf{U} = \mathbf{A}, \quad u_{ii} = a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}u_{ki}, \quad i \in [2, n], \quad \mathbf{L}\mathbf{z} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{U}\mathbf{x} = \mathbf{z}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{L}$  – нижние треугольные матрицы,  $\mathbf{U}$  – верхняя, последние строки в (6) и (7) носят название обратной подстановки соответствующего разложения.

## Положительно определенные матрицы

В качестве средства увеличения диагональных коэффициентов в [2] предложена операция разделения скалярного произведения двух векторов на два числа:  $s_1$  и  $s_2$ , первое из которых содержит старшие разряды скалярного произведения, а второе – младшие. Если количество разрядов мантиссы числа с плавающей точкой равно  $t$ , а количество разрядов в  $s_2 - \tau$ , то количество разрядов в  $s_1$  равно  $(t - \tau)$  при одном и том же значении порядка обоих чисел. Число  $s_1$  продолжает участвовать в дальнейших операциях разложения, а  $s_2$  отсекается от вычислительного процесса и запоминается в матрице  $\mathbf{E}$ .

LU-разложение. В вычислительной практике общепринятым для LU-разложения является выбор максимального ведущего элемента, как правило, по столбцу. В результате элементы матрицы  $\mathbf{L}$  близки к 1, а диагональные элементы матрицы  $\mathbf{U}$  не возрастают [4]. Это позволяет выбрать отличную от предложенной в [2] стратегию инициализации операции разделения, а именно использование барьера – некоторого положительного числа  $\varepsilon$  такого, что операция разделения выполняется в том случае, когда  $u_{ii} < \varepsilon$ . Значение  $\varepsilon$  можно выбрать из разных соображений, в частности, исходя из принятого представления – матрица хорошо обусловлена, если ее число обусловленности не превышает  $10^3$ . Тогда  $\varepsilon$  можно принять равным  $10^{-3}$  или  $10^{-4}$ .

В качестве примера выбрана верхняя матрица Хессенберга вида [5]

$$A = \begin{bmatrix} n & n-1 & n-2 & \dots & 3 & 2 & 1 \\ n-1 & n-1 & n-2 & \dots & 3 & 2 & 1 \\ 0 & n-2 & n-2 & \dots & 3 & 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

для  $n=8$  с числом обусловленности  $2,75 \cdot 10^5$ . Максимальный элемент матрицы  $L$  стандартного разложения без выбора ведущего элемента равен 6,85, с выбором  $-1$ . Минимальное  $u_{ii}$  с выбором  $-2,7 \cdot 10^{-5}$ .

Результаты приведены в табл. 1 (все элементы матрицы были разделены на 8, значение  $\tau$  в операции разделения было принято равным 15 при  $t=17$ ).

Таблица 1

**Результаты применения операции разделения для LU-разложения / Results of applying the split operation for LU decomposition**

$\varepsilon$	$k$	$\min u_{ii}$	$\text{cond}(M)$	$\text{cond}(Z)$
–	–	$2,7 \cdot 10^{-5}$	–	–
0,001	1	0,005	$1,2 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^2$

Как следует из табл. 1, решение плохо обусловленной СЛАУ сводится к получению матрицы  $U$  с существенно меньшим числом обусловленности, чем при стандартном разложении, вычислению обратными подстановками вектора  $\tilde{x}$  из (3) и вектора  $y_1$  из (5) и решению системы с треугольной в данном случае матрицей (4).

*Разложение Холецкого.* Для проверки эффективности разложения Холецкого использовалась матрица Гильберта, известная своей плохой обусловленностью [6], размерностью 8, 9 и 10. Стандартное разложение Холецкого прекращается во всех трех случаях при вычислении  $h_{88}$ . Результаты применения операции разделения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты применения операции разделения для разложения Холецкого / Results of applying the separation operation for the Cholesky decomposition**

$n$	$k$	$\text{cond}(M)$	$\text{cond}(Z)$	$\min h_{ii}$
8	1	$1,1 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
9	2	$1,1 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^{-2}$
10	3	$1,2 \cdot 10^9$	$9,2 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
10	4	$2,0 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^{-2}$

Данные первых трех строк табл. 2 получены при условии, что разделение чисел выполняется, когда подкоренное становится меньшим 0. Числа в четвертой строке получены при использовании барьера со значением 0,000001, что соответствует 0,001

для  $h_{ii}$ . Обусловленность матрицы  $M$  при этом уменьшается, но возрастает количество дополнительных операций.

### Матрицы неполного ранга

Покажем, что (3) можно использовать для решения (1) и в том случае, когда квадратная матрица  $A$  размерностью  $n$  является сингулярной (ее ранг  $r < n$ ). В этом случае наилучшее решение по методу наименьших квадратов выглядит следующим образом [7]:  $\tilde{x} = A^+b$ , где  $A^+$  – псевдообратная матрица. Наиболее известным методом вычисления таких матриц является метод сингулярного разложения (SVD). Он является достаточно сложным в реализации: оценка количества операций –  $12n^3$  [4]. Ниже рассматривается возможность вычисления псевдообратной матрицы предлагаемым в статье методом на примере матрицы с рангом  $n-1$ .

Так как  $A$  в нашем случае представляется в виде произведения двух матриц  $M$  и  $Z$ , то для получения  $A^+$  матрица  $M$  должна иметь  $r$  независимых столбцов, а  $Z$  –  $r$  независимых строк [8]. Положим, что матрица  $A$  имеет одну линейно зависимую строку. Тогда в процессе стандартного LU-разложения одна из строк треугольной матрицы  $U$  оказывается равной 0. Переставим ее вниз, прибавим к ее диагональному члену некоторое положительное число  $u_{nn}$  и завершим треугольное разложение. При этом элементы последней строки матрицы  $L$  равны 0, за исключением  $l_{nn}$ , который равен 1. В  $A$  сделаем соответствующую перестановку строк и последнюю строку сделаем нулевой, так что  $M$  отличается от  $A$  только членом  $m_{nn} = u_{nn}$ .

При  $k = 1$  в (5)  $e_n = m_{nn}$ ,  $y_{n1}$  равно единице и последняя строка в матрице  $Z$  равна нулю. При этом все ненулевые строки  $Z$  линейно независимы, последний столбец является линейной комбинацией остальных и ранг  $Z$  по строкам и по столбцам равен  $n-1$ . Так как последние строки в  $A$  и  $Z$  нулевые, то без внесения искажений в произведение  $MZ$  можно сделать нулевым последний столбец, а значит, и последнюю строку матрицы  $M$ . Получившуюся таким образом матрицу обозначим  $W$ . Так как матрицы  $W$  и  $Z$  имеют ранг  $r$ , то можно записать следующее выражение:  $A = WZ$ .

Тогда  $A^+ = Z^+W^+$ .

При инвертировании положительно определенной матрицы  $M$  значение элемента  $m_{nn}$  влияет только на тот столбец обратной матрицы, в котором он расположен. Если этот столбец сделан нулевым, то главная подматрица матрицы  $M^{-1}$  не изменится и будет равна  $W^+$  [9]. Это значит, что вычисление  $W^+$  сводится к обратной подстановке (7).

Вычисление псевдообратной матрицы  $Z^+$  удобно выполнить алгоритмом Гревилля: к единичной квадратной матрице размерностью  $(n-1)$  добавляется один столбец, который является линейной комбинацией остальных. Как следует из формул, приведенных в [8, с. 52, 53], вычисления в этом случае сводятся к умножению столбца на строку, определению нормы вектора и делению элементов вектора на положительное число.

Приведем пример работы алгоритма. В качестве матрицы неполного ранга выберем матрицу  $4 \times 4$ , последняя строка которой является линейно зависимой. После LU-разложения, обнаружения соответствующей строки в треугольной матрице, ее обнуления в  $A$  и добавления к ее диагональному члену единицы получим

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1/3 \\ 0 & 1 & 0 & 13/3 \\ 0 & 0 & 1 & -2/3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Далее вычисляем  $W^+$  и  $Z^+$ :

$$W = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & -1/3 & 1/3 \\ 2/3 & -4/3 & 1/3 & -4/3 \\ -1/3 & 2/3 & 1/3 & 2/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$W^+ = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & -1/3 & 0 \\ 2/3 & -4/3 & 1/3 & 0 \\ -1/3 & 2/3 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$Z^+ = \begin{bmatrix} 0,994 & 0,071 & -0,011 & 0 \\ 0,071 & 0,076 & 0,142 & 0 \\ -0,011 & 0,142 & 0,978 & 0 \\ -0,016 & 0,213 & -0,033 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A^+ = Z^+ W^+ = \begin{bmatrix} 0,3825 & 0,2295 & -0,3115 & 0 \\ 0,0273 & 0,0164 & 0,0492 & 0 \\ -0,235 & 0,459 & 0,377 & 0 \\ 0,1475 & -0,3115 & 0,0656 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица  $A^+$  совпадает с матрицей, полученной из исходной посредством алгоритма SVD (функция `pinv` из библиотеки `linalg` Python).

Для получения решения СЛАУ можно не вычислять полностью  $M^{-1}$ , а воспользоваться решением следующих двух систем:

$$\tilde{x} = Z^+ \tilde{x}, \quad W \tilde{x} = b.$$

Треугольное разложение  $W$  совпадает с разложением  $M$ , если в  $M$  сделать нулевым последний столбец матрицы  $U$ . Это позволяет воспользоваться обратной подстановкой, приняв значение  $\tilde{x}_n$  равным произвольному числу, в том числе и 0: последний столбец  $Z^+$  нулевой и значение  $\tilde{x}_n$  не влияет на остальные элементы этого вектора. При оценке трудоемкости операций можно ориентироваться на решение системы с помощью LU-разложения, а именно  $\frac{2}{3}n^3$ , так как сложность использованных операций по Гревиллю и умножения матрицы на вектор не превышает  $n^2$ .

При дальнейшем уменьшении ранга матрицы можно использовать приведенные обоснования для представления сингулярной матрицы в виде произведения 2 матриц, но вычисление  $Z^+$  рекуррентным алгоритмом Гревилля становится слишком дорогим. Поэтому оценка сложности алгоритма при  $r < n - 1$  требует дальнейших исследований.

## Заключение

В работе получены следующие результаты:

1. Показано, что увеличение минимальных или нулевых диагональных членов треугольных матриц, получаемых при стандартных треугольных разложениях, приводит к представлению матрицы исходной системы в виде произведения двух матриц, одна из которых отличается от исходной некоторым количеством увеличенных диагональных членов.

2. Для плохо обусловленных матриц в качестве средства увеличения выбрана операция деления скалярного произведения на два числа; обсуждается условие инициализации этой операции и ее эффективность для симметричных и несимметричных матриц.

3. Если исходная матрица сингулярна и ранг ее на единицу меньше размерности, то для ее представления в виде произведения двух матриц следует в процессе LU-разложения добавить некоторое положительное число к нулевому диагональному элементу матрицы  $U$ . В этом случае сложность решения СЛАУ можно сравнить со сложностью алгоритма Гаусса.

## Литература

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит.-ры, 1979. 285 с.
2. Лутай В.Н. Повышение устойчивости треугольного разложения плохо обусловленных матриц //

Сиб. журн. вычисл. математики. 2019. Т. 22, № 4. С. 473–481.

3. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит-ры, 1984. 320 с.

4. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления: пер. с англ. М.: Мир, 2010. 548 с.

5. Уилкинсон Дж. Алгебраическая проблема собственных значений. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит-ры, 1967. 564 с.

6. Форсайт Дж., Моллер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. М.: Мир, 1969. 168 с.

7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. 5-е изд. М.: Физматлит, 2010. 560 с.

8. Альберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание : пер. с англ. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит-ры, 1977. 224 с.

9. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов : пер. с англ. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит-ры, 1986. 232 с.

#### References

1. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. (1979). *Methods for solving ill-posed problems*. Moscow, Nauka Publ.,

Main Edition of the Physical and Mathematical Literature, 285 p. (in Russian).

2. Lutay V.N. (2019). Increasing the stability of triangular decomposition of ill-conditioned matrices. *Siberian Journal of Numerical Mathematics*, vol. 12, No. 4, pp. 388-394.

3. Voevodin V. V., Kuznetsov Yu.A. (1984). *Matrixes and computations*. Moscow, Nauka Publ., Main Edition of the Physical and Mathematical Literature, 320 p. (in Russian).

4. Golub G., Van Loan C. (2010). *Matrix computations*. Moscow, Mir Publ., 548 p. (in Russian).

5. Wilkinson J. (1967). *The algebraic eigenvalue problem*. Moscow, Nauka Publ., Main Edition of the Physical and Mathematical Literature, 564 p. (in Russian).

6. Forsythe G., Moler C. (1969). *Computer solution of linear algebraic systems*. Moscow, Mir Publ., 168 p. (in Russian).

7. Gantmaher F. R. (2010). *Matrix theory*. Moscow, Fizmatlit Publ., 560 p. (in Russian).

8. Albert A. (1977). *Regression, pseudo-inversion and recurrent estimation*. Moscow, Nauka Publ., Main Edition of the Physical and Mathematical Literature, 224 p. (in Russian).

9. Lawson C., Hanson R. (1986). *Solving least squares problems*. Moscow, Nauka Publ., Main Edition of the Physical and Mathematical Literature, 232 p. (in Russian).

УДК 519.634

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-16-21

## МЕДЛЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА В ЖИДКОСТИ ПОСЛЕ ОТРЫВНОГО УДАРА

© 2021 г. М.В. Норкин<sup>1</sup><sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

## SLOW MOTIONS OF A CIRCULAR CYLINDER IN A LIQUID AFTER A SEPARATION IMPACT

M.V. Norkin<sup>1</sup><sup>1</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Норкин Михаил Викторович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: norkinmi@mail.ru

Michail V. Norkin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Professor, Department of Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Milchakova St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: norkinmi@mail.ru

Рассматривается плоская задача об отрывном ударе кругового цилиндра, полностью погруженного в идеальную несжимаемую тяжелую жидкость. Предполагается, что после удара цилиндр движется в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Позади тела образуется присоединенная каверна, форма которой зависит от физических и геометрических параметров задачи. Требуется изучить процесс схлопывания каверны при малых скоростях движения цилиндра, соответствующих небольшим числам Фруда. Решение задачи строится при помощи асимптотических разложений по малому параметру, которым является безразмерная скорость движения цилиндра. При этом в качестве характерной скорости выступает величина, равная корню квадратному из произведения радиуса цилиндра на ускорение свободного падения. В результате такого выбора указанный малый параметр совпадает с числом Фруда, и поэтому можно считать, что асимптотика задачи строится при малых числах Фруда. В главном асимптотическом приближении формулируется смешанная задача теории потенциала с односторонними ограничениями на поверхности тела. С ее помощью определяется положение точек отрыва в каждый момент времени и находится время схлопывания тонкой каверны. Полученные результаты могут быть использованы для решения практических задач корабельной гидродинамики с учетом явления кавитации.

**Ключевые слова:** идеальная несжимаемая жидкость, круговой цилиндр, удар, схлопывание каверны, асимптотика, динамика точек отрыва, свободная граница, число Фруда, число кавитации.

The plane problem of the separation impact of a circular cylinder completely immersed in an ideal incompressible heavy liquid is considered. It is assumed that after the impact, the cylinder moves horizontally at a constant speed. An attached cavity is formed behind the body, the shape of which depends on the physical and geometric parameters of the problem. It is required to study the process of collapse of the cavity at low velocities of the cylinder, which correspond to small Froude numbers. The solution to the problem is constructed using asymptotic expansions in a small parameter, which is the dimensionless speed of the cylinder. In this case, as the characteristic speed of the problem, a value is chosen equal to the square root of the product of the radius of the cylinder and the acceleration of gravity. As a result of this choice the indicated small parameter coincides with the Froude number, and therefore, we can assume that the asymptotics of the problem is constructed for small Froude numbers. In the leading asymptotic approximation, a mixed problem of potential theory with one-sided constraints on the surface of the body is formulated. With its help, the position of the separation points at each moment of time is determined and the time of collapse of a thin cavity is found. The results obtained can be used to solve practical problems of ship hydrodynamics, in which it is necessary to take into account the phenomenon of cavitation.

**Keywords:** ideal incompressible liquid, circular cylinder, impact, collapse of a cavity, asymptotics, dynamics of separation points, free boundary, Froude number, cavitation number.

## Введение

Проблема ударного взаимодействия твердого тела с жидкостью с учетом явления кавитации является актуальной для современной гидродинамики. Для решения большого числа конкретных задач очень важную роль играет классическая модель удара с отрывом [1]. Представляя большой самостоятельный интерес, эта модель дает начальные условия для решения более сложной динамической кавитационной задачи. Получить полное решение этой задачи удара в общем случае не представляется возможным ввиду многообразия физических явлений и процессов, происходящих после удара. В частности, обратим внимание на то, что переход от классической модели удара к дальнейшей динамике связан с серьезными погранслоевыми проблемами, возникающими вблизи точек пересечения внутренней свободной границы жидкости с поверхностью тела (вблизи точек отрыва). В связи с этим большую актуальность приобретают асимптотические методы решения таких задач. К настоящему времени разработаны асимптотические методы, в которых разложения ведутся по малому времени, а также по малому параметру, которым является безразмерная скорость движения цилиндра [2, 3]. Первый подход позволяет определить форму присоединенной каверны на некотором начальном этапе движения тела в жидкости. Второй метод дает возможность получить полное решение проблемы образования и схлопывания каверны при малых скоростях движения цилиндра. Ранее, в статье [3], был проведен асимптотический анализ задачи о медленных вертикальных движениях прямоугольного цилиндра в жидкости после его отрывного удара. В настоящей работе дается обобщение этих результатов на случай горизонтального отрывного удара кругового цилиндра, полностью погруженного в жидкость. В главном асимптотическом приближении формулируется задача с односторонними ограничениями. На её основе определяется динамика точек отрыва и описывается процесс схлопывания тонкой каверны. Приводится конкретный пример с численным решением.

Обратим внимание на некоторые современные работы, в которых классические задачи удара решаются с применением аналитических методов [4–9]. Эти работы свидетельствуют о широком интересе к данной тематике. Близкие вопросы возникают также в задачах проникания твердых тел в идеальную несжимаемую жидкость. Обзор соответствующих работ дан в [10].

## Общая постановка задачи

Рассматривается плоская задача об отрывном ударе кругового цилиндра, полностью погруженного в идеальную несжимаемую тяжелую жидкость. Предполагается, что после удара цилиндр движется в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Позади тела образуется присоединенная каверна, форма которой зависит от искусственного поддува воздуха, а также от физических и геометрических параметров задачи. Требуется изучить процесс схлопывания каверны при медленных движениях цилиндра. Давление в каверне предполагается постоянным и равным давлению насыщенных паров жидкости или газа (естественная ситуация) или давлению газа при искусственной кавитации. При малой скорости движения цилиндра и не очень большом давлении в каверне (порядка атмосферного) точки отрыва внутренней свободной границы жидкости будут двигаться по направлению друг к другу. Последнее соответствует монотонному уменьшению зоны отрыва. Схлопывание каверны происходит тогда, когда эта зона полностью исчезает. Подчеркнем, что такая модель схлопывания справедлива, вообще говоря, только при малых скоростях движения цилиндра. При увеличении скорости цилиндра картина течения может измениться. Например, может произойти отрыв газового пузыря от тела или образоваться кумулятивная струйка, направленная к телу. Эти и многие другие вопросы остаются на сегодняшний день неизученными. Математическая постановка задачи, записанная в подвижной системе координат, связанной с цилиндром, имеет вид (рисунок):

$$\Delta\Phi = 0, \quad r \in \Omega(t), \quad \frac{\partial\Phi}{\partial n} = \dot{h}(t)n_x, \quad r \in S_{11}(t),$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} - \dot{h}(t)\frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 + g(y-H) + \frac{p_c - p_a}{\rho} = 0,$$

$$r \in S_{12}(t);$$

$$\frac{(\Phi_x - \dot{h}(t))x + \Phi_y y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \left[ R'_0(\theta) + \frac{\partial\eta}{\partial\theta} \right] \dot{\theta}(t) + \frac{\partial\eta}{\partial t},$$

$$\dot{\theta}(t) = R^{-2} [\Phi_{y,x} - (\Phi_x - \dot{h}(t))y], \quad R \in S_{12}(t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} - \dot{h}(t)\frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 + g\xi(x,t) = 0, \quad r \in S_2(t),$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial y} = \frac{\partial\xi}{\partial x} \left[ \frac{\partial\Phi}{\partial x} - \dot{h}(t) \right] + \frac{\partial\xi}{\partial t}, \quad r \in S_2(t),$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial y} = 0, \quad y = -H_b; \quad \nabla\Phi \rightarrow \infty, \quad x \rightarrow \pm\infty,$$

$$\Phi(x, y, 0) = \Phi_0(x, y), \quad \xi(x, 0) = 0, \quad \eta(\theta, 0) = 0.$$

Течение жидкости в начальный момент времени (в момент, непосредственно следующий после удара) имеет потенциал  $\Phi_0(x,y)$ , который определяется на основе решения смешанной краевой задачи теории потенциала с краевыми условиями типа неравенств [1]:

$$\Delta\Phi_0 = 0, \quad r \in \Omega(0),$$

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial n} = v_0 n_x, \quad \Phi_0 \leq 0, \quad r \in S_{11}(0);$$

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial n} \geq v_0 n_x, \quad \Phi_0 = 0, \quad r \in S_{12}(0);$$

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial y} = 0, \quad y = -H_b; \quad \nabla\Phi_0 \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \pm\infty.$$

Здесь и далее используются следующие обозначения:  $\Phi(x,y,t)$  – потенциал скоростей абсолютного движения жидкости, записанный относительно подвижной системы координат;  $\Omega(t)$  – область, занятая жидкостью;  $S_{11}(t)$  – часть поверхности цилиндра, на которой не происходит отрыва частиц жидкости;  $S_{12}(t)$  – оторвавшаяся от поверхности цилиндра внутренняя свободная граница жидкости (граница каверны);  $S_2(t)$  – свободная поверхность жидкости, которая первоначально была горизонтальной;  $\rho = \text{const}$  – плотность жидкости;  $p_a$  – атмосферное давление;  $p_c$  – давление в каверне;  $\dot{h}(t) = v_0$  – скорость движения цилиндра после удара;  $y = H$  – невозмущенная внешняя свободная граница жидкости;  $y = -H_b$  – дно бассейна;  $r$  – радиус-вектор с координатами  $(x,y)$ .

Уравнения внутренней и внешней свободных границ жидкости относительно подвижной системы координат имеют вид

$$R = R_0(\theta) + \eta(\theta, t); \quad y = H + \zeta(x, t).$$

Граница каверны описывается в полярных координатах  $(R, \theta)$ , где функция  $R_0(\theta)$  определяет форму границы тела. В случае кругового цилиндра  $R_0(\theta) = a$ , где  $a$  – радиус цилиндра. Неподвижные координаты  $X, Y$  связаны с подвижными  $x, y$  соотношениями  $X=x, Y=y+h(t)$ .

В точках пересечения внутренней свободной границы жидкости с поверхностью цилиндра (в точках отрыва) ставится условие Кутты – Жуковского, означающее, что скорость жидкости в этих точках должна быть конечной.

### Асимптотический анализ задачи при малых числах Фруда

Сначала преобразуем задачу (1), введя соответствующие безразмерные независимые переменные

по формулам (штрихами помечаются размерные величины)

$$t' = \frac{a}{\sqrt{ga}} t, \quad x' = ax, \quad y' = ay,$$

$$\Phi' = a\sqrt{ga}\Phi, \quad p' = \rho g a p.$$

При таком определении безразмерных переменных основные безразмерные физические параметры задачи (числа Фруда и кавитации) будут определяться равенствами

$$\varepsilon = Fr = \frac{v_0}{\sqrt{ga}}, \quad \chi = \frac{p_a - p_c}{\rho g a}.$$

Число Фруда фактически совпадает с безразмерной скоростью движения цилиндра, которая играет роль малого параметра. Так как при уменьшении параметра  $\varepsilon$  скорость движения точек отрыва сильно возрастает (или, что равносильно, быстро уменьшается время схлопывания), то целесообразно ввести растянутое время  $\tau$  по формуле  $t = \varepsilon\tau$ . После проведенных преобразований задача (1) принимает вид

$$\Delta\varphi = 0, \quad r \in \Omega(t), \quad \frac{\partial\varphi}{\partial n} = n_x, \quad r \in S_{11}(t),$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\tau} - \varepsilon^2 \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{1}{2} \varepsilon^2 (\nabla\varphi)^2 + y - H - 0,5\chi = 0,$$

$$r \in S_{12}(t);$$

$$\frac{(\varphi_x - 1)x + \varphi_y y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \left[ R'_0(\theta) + \frac{\partial\zeta}{\partial\theta} \right] \dot{\theta}(\tau) + \varepsilon^{-2} \frac{\partial\zeta}{\partial\tau},$$

$$\dot{\theta}(\tau) = R^{-2} [\varphi_y x - (\varphi_x - 1)y], \quad r \in S_{12}(t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\tau} - \varepsilon^2 \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{1}{2} \varepsilon^2 (\nabla\varphi)^2 + \psi(x, t) = 0, \quad r \in S_2(t),$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial y} = \frac{\partial\psi}{\partial x} \left[ \frac{\partial\varphi}{\partial x} - 1 \right] + \varepsilon^{-2} \frac{\partial\psi}{\partial\tau}, \quad r \in S_2(t),$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial y} = 0, \quad y = -H_b; \quad \nabla\varphi \rightarrow \infty, \quad x \rightarrow \pm\infty,$$

$$\varphi(x, y, 0) = \varphi_0(x, y), \quad \psi(x, 0) = 0, \quad \zeta(\theta, 0) = 0,$$

где новые функции  $\varphi, \zeta, \psi$  связаны с функциями  $\Phi, \eta, \xi$  равенствами

$$\Phi(x, y, \varepsilon\tau) = \varepsilon\varphi(x, y, \tau), \quad \zeta(\theta, \tau) = \eta(\theta, \varepsilon\tau),$$

$$\psi(x, \tau) = \xi(x, \varepsilon\tau),$$

а функция  $\varphi_0(x, y)$  совпадает с  $\Phi_0(x, y)$  при  $v_0 = 1$ .

Следует отметить, что после перехода к безразмерным переменным для функций  $\Phi, \eta, \xi$  и величин  $H, H_b$  сохраняются прежние обозначения.

Решение задачи (2) будем искать в виде следующих асимптотических разложений:

$$\varphi(x, y, \tau) = \varphi_1(x, y, \tau) + \dots;$$

$$\zeta(\theta, \tau) = \varepsilon^2 \zeta_1(\theta, \tau) + \dots;$$

$$\psi(x, \tau) = \varepsilon^2 \psi_1(x, \tau) + \dots;$$

$$\Theta_1(\varepsilon \tau) = \theta_1(\tau) + \dots; \Theta_2(\varepsilon \tau) = \theta_2(\tau) + \dots,$$

где  $\Theta_1(t), \Theta_2(t)$  – угловые координаты точек отрыва в момент времени  $t$ . Многоточием обозначены члены более высокого порядка малости по  $\varepsilon$ . Для определенности считаем, что  $\Theta_1(t) < \Theta_2(t)$ .

Подставляя эти разложения в уравнение и краевые условия задачи (2), осуществляя с помощью формулы Тейлора перенос краевых условий с возмущенных участков границы области  $\Omega(t)$  на первоначально невозмущенный уровень и приравнивая величины при одинаковых степенях  $\varepsilon$ , приходим в главном асимптотическом приближении к смешанной краевой задаче теории потенциала в области  $\Omega(0)$ . В предположении, что точки отрыва монотонно сближаются, проинтегрируем динамическое условие в зоне отрыва по времени от 0 до  $\tau$ . При этом точку  $(x, y)$  на поверхности цилиндра считаем фиксированной и принадлежащей зоне отрыва, соответствующей моменту времени  $\tau$ . Интегрируя динамическое условие на внешней свободной границе, приходим к следующей задаче:

$$\Delta \varphi_1 = 0, \quad r \in \Omega(0),$$

$$\varphi_1 = (0,5\chi + H - y)\tau, \quad R = 1, \quad \theta_1(\tau) < \theta < \theta_2(\tau),$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = n_x, \quad R = 1, \quad \theta_2(\tau) < \theta < \theta_1(\tau) + 2\pi, \quad (3)$$

$$\varphi_1 = 0, \quad y = H,$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = 0, \quad y = -H_b; \quad \nabla \varphi_1 \rightarrow \infty, \quad x \rightarrow \pm\infty.$$

Так как уравнение и краевые условия последней задачи не зависят от малого параметра, то старшие приближения для угловых координат точек отрыва тоже не будут от него зависеть. Величины  $\theta_1(\tau)$ ,  $\theta_2(\tau)$  определяются из условия Кутты – Жуковского, которое, по крайней мере локально, будет эквивалентно системе неравенств:

$$(0,5\chi + H - y)\tau - \varphi_1(x, y, \tau) + \varphi_0(x, y) \geq 0, \quad R = 1,$$

$$\theta_2(\tau) < \theta < \theta_1(\tau) + 2\pi, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} \geq n_x, \quad R = 1, \quad \theta_1(\tau) < \theta < \theta_2(\tau). \quad (5)$$

Первое неравенство означает, что давление в зоне контакта не может быть ниже, чем в каверне. Второе говорит о том, что жидкие частицы не могут входить внутрь твердого тела.

Поскольку динамика зоны отрыва априори неизвестна, то задача (3), (4) относится к классу задач со свободными границами. Наличие сразу двух неравенств гарантирует существование единственного решения. В дальнейшем эти неравенства будут использоваться для численного решения задачи (3), (4) итерационным методом.

### Численная реализация и анализ результатов

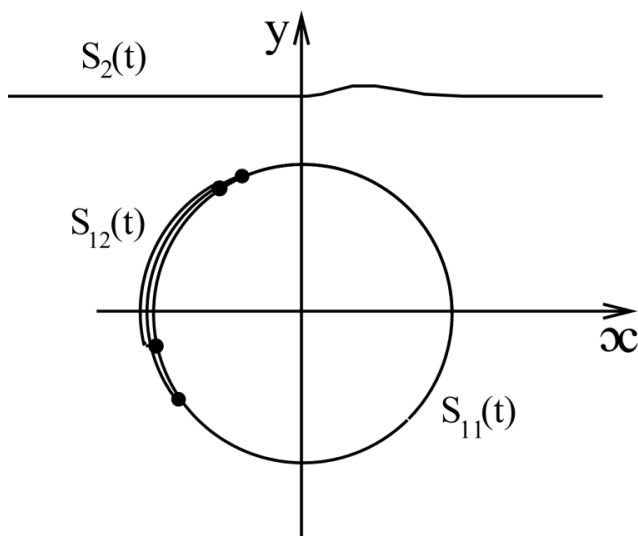
Исследование нелинейной нестационарной задачи (2) при малых  $\varepsilon$  сводится к решению смешанной краевой задачи теории потенциала с односторонними ограничениями на поверхности тела. Численный метод решения последней задачи при любом фиксированном  $\tau$  основывается на специальном итерационном процессе, в котором последовательно уточняется неизвестная заранее зона отрыва частиц жидкости. В качестве начального приближения выбирается решение задачи (3) (без учета неравенств) с такой маленькой предполагаемой зоной отрыва, в окрестности которой нарушается динамическое условие в виде неравенства (4). Точки на поверхности цилиндра (расположенные вблизи начальной зоны отрыва), в которых левая часть этого неравенства принимает локальные отрицательные минимумы, выбираются за следующие приближения к точкам отрыва. Далее процесс повторяется. Каждый следующий шаг итерационного процесса приводит к уменьшению зоны указанных отрицательных значений. Процесс заканчивается, когда эта зона полностью исчезает. Отметим, что линейные смешанные задачи теории потенциала, возникающие на каждом шаге итерационного процесса, решаются численно методом конечных элементов с применением пакета FreeFem++ [11]. Более подробно указанный метод описан в работах автора, посвященных начальному этапу движения твердых тел в жидкости с учетом явления кавитации [2].

Изучим динамику точек отрыва и определим примерное время схлопывания тонкой каверны для конкретного примера. Пусть  $\chi = 0$ ,  $H = 1,5$ ,  $H_b = 2$ , а боковые стенки, необходимые для численной реализации, удалены от тела на расстояние, которое в шесть раз превышает радиус цилиндра. В таблице приведены численные значения угловых координат точек отрыва (в главном приближении) при различных значениях  $\tau$ . При плавном увеличении  $\tau$  зона отрыва монотонно уменьшается и при  $\tau > 0,5$  перемещается в область  $y > 0$ . При  $\tau = 0,68$  эта зона практически уже не видна (происходит схлопывание тонкой каверны).

Можно считать, что численные результаты, приведенные в таблице, соответствуют случаю  $\varepsilon = 1$ . Однако эффективность полученных асимптотических формул можно гарантировать только при малых  $\varepsilon$ . Для таких  $\varepsilon$  численные значения угловых координат точек отрыва также могут быть получены на основании приведенной таблицы с помощью элементарного пересчета. Так, например, при  $\varepsilon = 0,5$  моментам реального времени  $t = 0,1; 0,2$  соответствуют значения растянутого времени ( $t = 0,5\tau$ )  $\tau = 0,2; 0,4$ . В этом случае время схлопывания каверны  $t \approx 0,34$ . Отметим также, что на рисунке изображены присоединенные каверны, соответствующие именно этим моментам времени. Как показывают проведенные исследования, процесс схлопывания каверны сопровождается небольшим увеличением возмущения внутренней свободной границы жидкости.

**Численные значения угловых координат точек отрыва для случая  $\chi = 0$ ,  $H = 1,5$ ,  $H_b = 2$  / The numerical values of the angular coordinates of the separation points for the case  $\chi = 0$ ,  $H = 1,5$ ,  $H_b = 2$**

$\tau$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,67
$\theta_1(\tau)$	1,8	1,89	1,99	2,08	2,18	2,29	2,41	2,5	2,57
$\theta_2(\tau)$	4,06	3,9	3,72	3,54	3,35	3,14	2,91	2,76	2,67



Постановка задачи. Динамика присоединенной каверны после удара / Formulation of the problem. Dynamics of the attached cavity after impact

## Заключение

В статье дано полное решение проблемы образования и схлопывания присоединенной каверны при горизонтальном ударе кругового цилиндра, полностью погруженного в жидкость. Исследование задачи проведено в предположении, что скорость движения цилиндра после удара является малой величиной. Главным моментом работы является постановка задачи с односторонними ограничениями, на основе которой определяется динамика зоны отрыва и находится примерное время схлопывания тонкой каверны. Рассмотрен конкретный численный пример, демонстрирующий описанный выше процесс схлопывания. Полученные в главном асимптотическом приближении результаты носят общий характер и легко переносятся на плавающие тела другой формы.

## Литература

1. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука, 1966. 448 с.
2. Норкин М.В. Образование каверны при наклонном отрывном ударе кругового цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости // Сиб. журн. индустриальной математики. 2016. Т. 19, № 4. С. 81–92. Doi 10.17377/sibjim.2016.19.409.
3. Норкин М.В. Асимптотика медленных движений прямоугольного цилиндра в жидкости после отрывного удара // Уч. зап. Казан. ун-та. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 162, кн. 4. С. 426–440. Doi 10.26907/2541-7746.2020.4.426-440.
4. Поляков Н.В., Гоман О.Г., Катан В.А. К вопросу об ударном взаимодействии тела и жидкости со свободной поверхностью при наличии отрыва // Докл. НАН Украины. 2016. № 8. С. 46–52. Doi 10.15407/dopovid2016.08.046.
5. Гоман О.Г., Катан В.А. Ударное взаимодействие жидкости и наклонной пластинки на ее свободной поверхности. Определение суммарных силовых характеристик // Вестн. Днепропетровского ун-та. Механика. 2018. № 26(5). С. 118–127. Doi 10.15421/371814.
6. Гоман О.Г., Никулина Т.М. Ударное взаимодействие тела в виде кругового сегмента с жидкостью с образованием зоны отрыва // Вестн. Днепропетровского ун-та. Механика. 2019. № 27(5). С. 54–66. Doi 10.15421/371906.
7. Hilmervik K.B., Tyvand P.A. Incompressible impulsive wall impact of liquid cylinders // J. Eng. Math. 2017. Vol. 103, № 1. P. 159–171. Doi 10.1007/s10665-016-9866-6.
8. Hilmervik K.B., Tyvand P.A. Impact of narrow plates on broader liquid bodies // Appl. Ocean Res. 2019. Vol. 87. P. 247–255. Doi 10.1016/j.apor.2019.04.002.

9. Savchenko Y., Savchenko G., Semenov Y.A. Impulsive motion inside a cylindrical cavity // *Math.* 2020. № 8(2). P. 192. Doi 10.3390/math8020192.

10. Reinhard M., Korobkin A.A., Cooker M.J. Cavity formation on the surface of a body entering water with deceleration // *J. Eng. Math.* 2016. Vol. 96(1). P. 155–174. Doi 10.1007/s10665-015-9788-8.

11. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Использование пакета конечных элементов FreeFem++ для задач гидродинамики, электрофореза и биологии. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 256 с.

#### References

1. Sedov L.I. (1966). *Plane problems of hydrodynamics and aerodynamics*. Moscow, Nauka Publ., 448 p. (in Russian).

2. Norkin M.V. (2016). Cavity Formation at the Inclined Separated Impact on a Circular Cylinder under a Free Surface of a Heavy Liquid. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, vol. 10, No. 4, pp. 538-548. Doi 10.1134/S1990478916040104.

3. Norkin M.V. (2020). Asymptotics of slow motions of a rectangular cylinder in a liquid after a separation impact. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, vol. 162, No. 4, pp. 426-440. Doi 10.26907/2541-7746.2020.4.426-440. (in Russian).

4. Polyakov N.V., Goman O.G., Katan V.A. (2016). To the question of the impact interaction of a body and a liquid with a free surface at the presence of a separation.

*Dokl. NAN Ukrainy*, No. 8, pp. 46-52. Doi 10.15407/dopovidi2016.08.046. (in Russian).

5. Goman O.G., Katan V.A. (2018). Impact interaction of liquid and inclined plate on its free surface. Definition total power characteristics. *Vestnik Dnepropetrovskogo universiteta. Mekhanika*, No. 26 (5), pp. 118-127. Doi 10.15421/371814. (in Russian).

6. Goman O.G., Nikulina T.M. (2019). Impact interaction of the body in the form a circular segment with a liquid with the formation of a separation zone. *Vestnik Dnepropetrovskogo universiteta. Mekhanika*, No. 27 (5), pp. 54-66. Doi 10.15421/371906. (in Russian).

7. Hilmervik K.B., Tyvand P.A. (2017). Incompressible impulsive wall impact of liquid cylinders. *J. Eng. Math.*, vol. 103, No. 1, pp. 159-171. Doi 10.1007/s10665-016-9866-6.

8. Hilmervik K.B., Tyvand P.A. (2019). Impact of narrow plates on broader liquid bodies. *Appl. Ocean Res.*, vol. 87, pp. 247-255. Doi 10.1016/j.apor.2019.04.002.

9. Savchenko Yu., Savchenko G., Semenov Yu.A. (2020). Impulsive motion inside a cylindrical cavity. *Mathematics*, No. 8 (2), p. 192. Doi 10.3390/math8020192.

10. Reinhard M., Korobkin A.A., Cooker M.J. (2016). Cavity formation on the surface of a body entering water with deceleration. *J. Eng. Math.*, vol. 96 (1), pp. 155-174. Doi 10.1007/s10665-015-9788-8.

11. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. (2008). *Using the finite element package FreeFem++ for hydrodynamics problems, electrophoresis, and biology*. Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 256 p. (in Russian).

УДК 539.3

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-22-33

## ПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОНТАКТНЫЕ И СМЕШАННЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ (обзор)\*

© 2021 г. Д.А. Пожарский<sup>1</sup><sup>1</sup>Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

## PERIODIC CONTACT AND MIXED PROBLEMS OF THE ELASTICITY THEORY (Review)

D.A. Pozharskii<sup>1</sup><sup>1</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Пожарский Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: pozharda@rambler.ru

Dmitrii A. Pozharskii - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Don State Technical University, Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: pozharda@rambler.ru

Приводится обзор результатов, полученных при исследовании периодических контактных и смешанных задач плоской, осесимметричной и пространственной теории упругости. Среди смешанных задач выделяются задачи о системах разрезов (трещин), интегральные уравнения которых связаны с интегральными уравнениями контактных задач. Интерес к периодическим контактным задачам связан с необходимостью изучения дискретного контакта шероховатых (волнистых) поверхностей. Наряду с классическими упругими областями (полуплоскость, полупространство, плоскость и пространство) рассматриваются периодические задачи для цилиндра, слоя, конуса и пространственного клина. Большинство публикаций, начиная с основополагающих работ Вестергаарда и Штаермана, посвящено периодическим задачам плоской теории упругости. Здесь можно выделить подходы, основанные на использовании функций комплексной переменной, рядов Фурье, функций Грина и потенциальных функций. Получил развитие подход механики разрушения к исследованию плоской периодической контактной задачи. Рассматриваются подходы и методы, позволяющие при периодическом контакте учесть силы трения, адгезию и износ. Приводятся методы исследования пространственных периодических и двоякопериодических контактных и собственно смешанных задач, среди которых выделяются методы локализации, асимптотические, нелинейных граничных интегральных уравнений, быстрое преобразование Фурье. Простейшей трехмерной моделью упругого тела является полупространство. Однако для простейшей периодической системы штампов – прямолинейной цепочки – трехмерные контактные задачи (нормальный контакт или тангенциальный контакт при сдвиге сцепленных накладок) оказываются некорректными, так как интегральные уравнения содержат расходящиеся ряды. В работах И.Г. Горячевой по трехмерным периодическим задачам круговые штампы располагаются специальным образом (по круговым орбитам, центры штампов задаются полярными координатами). В этом случае доказывается сходимость рядов в интегральном уравнении (при решении важно, что форма штампов именно круговая). Также вместо полупространства можно рассматривать слой, однако тогда, как показал В.М. Александров, усложняется ядро интегрального уравнения. В предлагаемой статье показывается, что для случая периодической прямолинейной цепочки штампов произвольной формы в плане контактная задача для полупространства становится корректной при усложнении граничных условий. Именно следует закрепить часть границы полупространства – поставить условия скользящей или жесткой заделки на полуплоскости, граница которой параллельна оси цепочки штампов и удалена от нее на произвольное конечное расстояние. При этом в случае скользящей заделки ядро интегрального уравнения периодической задачи не содержит квадратур, а состоит только из однократного сходящегося ряда (нормальный контакт, доказывается эквивалентность двух форм ядра). Рассматривается как классическая перколяция (просачивание соседних областей контакта друг в друга, исследованное в работах К.Л. Джонсона, В.А. Ястребова и их соавторов) при усилении трехмерного периодического контакта, так и перколяция для прямолинейной цепочки штампов. Аналогичный подход предлагается для случая периодического тангенциального контакта (сдвиг сцепленной с границей

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-11-50007 / The reported study was funded by RFBR, project number 20-11-50007.

полупространства цепочки накладок вдоль или перпендикулярно оси цепочки). Здесь тонким моментом является выделение единственных решений вспомогательных краевых задач, поскольку линия смены граничных условий на границе полупространства может провоцировать неединственность. Предлагаемая методика в дальнейшем может позволить рассмотреть более сложные трехмерные периодические контактные задачи для прямолинейных цепочек со сменой граничных условий внутри периода.

**Ключевые слова:** периодические контактные и смешанные задачи, теория упругости.

*Results are reviewed collected in the investigations of periodic contact and mixed problems of the plane, axially symmetric and spatial elasticity theory. Among mixed problems, cut (crack) problems are focused integral equations of which are connected with those for contact problems. The periodic contact problems stimulate research of the discrete contact of rough (wavy) surfaces. Together with classical elastic domains (half-plane, half-space, plane and full space), we consider periodic problems for cylinder, layer, cone and spatial wedge. Most publications including fundamental ones by Westergaard and Shtaerman deals with plane periodic problems of the elasticity theory. Here, one can mention approaches based on complex variable functions, Fourier series, Green's functions and potential functions. A fracture mechanics approach to the plane periodic contact problem was developed. Methods and approaches are considered which allow us to take friction forces, adhesion and wear into account in the periodic contact. For spatial periodic and doubly periodic contact and properly mixed problems, we describe such methods as the localization method, the asymptotic methods, the method of nonlinear boundary integral equations, the fast Fourier transform. The half-space is the simplest model for elastic solids. But for the simplest straight-line periodic punch system, some three-dimensional contact problems (normal contact or tangential contact for shifted cohesive coatings) turn out to be incorrect because their integral equations contain divergent series. Considering three-dimensional periodic problems, I.G. Goryacheva disposes circular punches in special way (circular orbits, polar coordinated are used for centers of the punches), in this case one can prove convergence of the series in the integral equation (it is important that the punches are circular). For the periodic problems for an elastic layer, V.M. Aleksandrov has shown that the series in integral equations converge but the kernels become more complicated. In the present paper, we demonstrate that for the straight-line periodic punch system of arbitrary form the contact problem for a half-space turns out to be correct in case of more complicated boundary conditions. Namely, it can be sliding support or rigid fixation of a half-plane on the half-space boundary, the half-plane boundary should be parallel to the straight-line (the punch system axis) for arbitrary finite distance between the parallel lines. On this way, for sliding support, the kernel of the periodic problem integral equation kernel is free of integrals, it consists of single convergent series (normal contact, the kernel is given in two equivalent forms). We consider classical percolation (how neighboring contact domains penetrate one to another, investigated by K.L. Johnson, V.A. Yastrebov with co-authors) for the three-dimensional periodic contact amplification as well as percolation for the straight-line punch system. A similar approach is suggested for the case of periodic tangential contact (coatings system cohesive with a half-space boundary shifted along its axis or perpendicular to it). Here, one can separate out unique solutions of auxiliary problems because the line of changing boundary conditions on the half-space boundary can provoke non-uniqueness. The method proposed opens possibility to consider more complicated three-dimensional periodic contact problems for straight-line punch systems with changing boundary conditions inside the period.*

**Keywords:** periodic contact and mixed problems, elasticity theory.

## Введение

Контактные задачи продолжают привлекать внимание мировой науки [1, 2]. В периодических контактных задачах (ПКЗ) теории упругости профили обоих или одного из контактирующих тел распределяются периодически, например, вдоль какого-то принципиального направления на границе. Актуальность ПКЗ связана с тем, что такие профили часто встречаются в инженерных приложениях (синусоидальная волнистость, искусственные поверхности после лазерной обработки). В силу особенностей машинной обработки поверхности зачастую достаточно рассматривать двумерные (плоские) ПКЗ, которым посвящено большинство публикаций. Среди периодических смешанных задач (ПСЗ) выделяются задачи о системах трещин (разрезов), интегральные уравнения (ИУ) которых близки ИУ, возникающим в ПКЗ.

## Развитие идей Вестергаарда и Штаермана

В этом разделе рассматриваются в основном двумерные задачи. В пионерской работе в области ПКЗ Вестергаардом [3] получено точное решение для контакта одномерной синусоидальной поверхности с упругим полупространством. При использовании комплексной функции напряжений найдены граничные перемещения и зависимость области контакта от приложенной нагрузки. Дандарс с соавторами [4] свел аналогичную ПКЗ для двух синусоидальных поверхностей к парным рядам – уравнениям, а затем к ИУ типа Абеля, через решение которого выражаются основные характеристики контакта. Показано, что при возрастании нагрузки первоначально сплошной контакт внутри периода может стать множественным. Ряд методов плоской теории упругости успешно применялся при решении ПКЗ: методы теории функций комплексной

переменной [5–11], рядов Фурье [4, 12], функций Грина [13–16], потенциальных функций [3]. Вероятно, первой работой, где плоская ПКЗ сведена к ИУ, явилась книга Штаермана [13], в которой получены аналитические выражения для контактных давлений, определены области контакта, рассмотрен случай жестких штампов с плоским основанием. Исследовалась периодическая задача о вдавлении системы упругих полуполос в полосу [17]. Плоская ПКЗ для упругой многослойной плиты рассмотрена в статье [18]. Для построения ИУ использованы матрицы податливости многослойных плит. Предложен приближенный метод решения ИУ. Приведены численные результаты для трехслойной плиты.

Среди осесимметричных ПКЗ можно выделить задачи о периодической системе деформируемых или жестких бандажей на упругом цилиндре [19, 20]. Задачи сведены к ИУ. Для упругих бандажей предложены два метода: сведение к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (метод эффективен не для всех значений безразмерных геометрических параметров) и пригодный при любых значениях параметров метод, связанный с эллиптическими функциями Якоби и сингулярным ИУ. Для численного решения применён метод Мультиппа – Каландии. Для системы жестких бандажей предложен метод парных уравнений с переходом к бесконечной СЛАУ второго рода. Расчеты выполнены методом редукции. Эта задача эквивалентна контактной задаче об одном бандаже на конечном цилиндре при скользящей заделке торцов [21]. Показано [21], что при определенных значениях параметров система обладает максимальной жесткостью (интегральная характеристика контактных давлений). Изучалась обобщенная ПКЗ теории упругости для кольца [22]. Для решения использован метод парных рядов. Рассматривалась квазистатическая контактная задача о взаимодействии жесткого бандажа или вкладыша соответственно с вязкоупругим цилиндром или пространством с цилиндрической полостью [23]. Бандаж или вкладыш движутся по границам вязкоупругих тел без учета сил трения. Задачи сведены к ИУ, для приближенного решения которых использован модифицированный метод Мультиппа – Каландии. Аналогично изучен контакт движущегося штампа на вязкоупругом слое [23].

Рассматривалась ПКЗ о чистом сдвиге упругой полосы системой полосовых штампов [24]. Задача разбита на симметричную и несимметричную, обе сведены к ИУ. При помощи замен переменных для четного и нечетного случаев ИУ приведены к известным, решаемым в замкнутой форме.

В статье [25] подход механики разрушения развит на случай периодического контакта двух упругих поверхностей (плоская задача) при действии нормальной и касательной нагрузки, в том числе при учете зон полного сцепления и скольжения. Используется периодическое решение задачи Фламанна, полученное Блоком и Киrom [14], приводящее к системе граничных ИУ по области контакта, в которую входят нормальные и касательные напряжения.

Как отмечено в [25, 26], подход механики разрушения может быть также применён к контактными задачам и ПКЗ с учетом адгезии в области контакта. В этом случае для определения сил сцепления обычно используется потенциал Леннарда – Джонса [27], который встречается в модели Мози – Дагдейла [28], двойной модели Вестергаарда [29] и др. В предельном случае Джонсона – Кендалла – Робертса возникает задача о трещине типа задачи Гриффитса, нормальное напряжение имеет особенность в кончике трещины. Для модели Дагдейла и некоторых других законов сцепления возникает задача о трещине типа Баренблатта без указанной сингулярности [25].

В [30] ПКЗ для слоя с учетом кулоновского трения и абразивного износа сведена к ИУ, содержащему фредгольмовский оператор по пространственной координате и вольтерровский – по времени. Предложен эффективный метод решения ИУ для случая, когда износостойкость одного из тел периодически меняется по пространственной координате. В [31] рассматривался контакт с силами трения двух упругих поверхностей, одна из которых имеет периодическую форму. В [15] исследованы плоские задачи о контактном взаимодействии периодической системы выпуклых штампов с упругой полуплоскостью для случая их скольжения при наличии трения и износа, а также для случая внедрения штампов при наличии сцепления (адгезии). Выведено каноническое сингулярное ИУ на дуге окружности в комплексной плоскости. Его решение выражается через простые алгебраические функции комплексного переменного, что существенно упрощает анализ уравнения. Получены асимптотические выражения для решения в случае, когда размер области контакта мал по сравнению с расстоянием между штампами.

ПКЗ встречаются как частные случаи контактных задач для шероховатых тел [32, 33]. Гринвуд [32] приводит пример, показывающий, что при периодической упругой шероховатости вида  $z = a \sin(kx)$  полного контакта упругих поверхностей можно добиться при давлении  $p = a \sin(kx)Ek / (2(1-\nu^2))$ ,

где  $E$  и  $\nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно.

Плоские периодические задачи теории упругости для бесконечного тела с трещинами описаны в монографии [34]. Задачи об упругом равновесии плоскости с системой прямолинейных или криволинейных трещин при циклической симметрии сведены к ИУ при использовании теории функций комплексной переменной. Показано, что первая основная задача для системы дугообразных трещин на окружности приводится к ИУ с ядром Коши, имеющим замкнутое решение. Рассмотрены ИУ периодических систем криволинейных трещин, коллинеарных трещин в упругой плоскости. Для сингулярных ИУ предложены численные методы, рассчитаны коэффициенты интенсивности напряжений (КИН). Получено замкнутое приближенное решение задачи о периодической системе параллельных трещин, основанное на аппроксимации ядер ИУ. Рассмотрен бесконечный ряд внешних параллельных трещин, двоякопериодическая система трещин [34]. Исследовались периодическая система трещин на границе раздела сред и их взаимодействие [35]. Установлено, что КИН снижается при уменьшении расстояния между трещинами. Таким образом, распространение трещины на границе раздела сдерживается соседними трещинами [35]. В [36] изучена задача для трещин в специфическом пористом упругом материале, описываемом моделью Ковина – Гудмана – Нунциато. Для периодической системы коллинеарных трещин задача сведена к ИУ по их поверхности. Ядро ИУ имеет вид ряда Фурье. Анализ главной части ядра показал, что ИУ является гиперсингулярным. Для решения ИУ авторы [36] использовали прямой численный метод. В [37] изучена способность многослойного упругого покрытия отражать упругие волны при наличии периодической системы трещин между отдельными его слоями. Построен алгоритм вычисления потоков энергии гармоник Флоке.

### Пространственные задачи

Важную роль в теории пространственных ПКЗ играет метод локализации, развитый Горячевой [27, 38, 39]. В этом методе круговые в плане штампы располагаются специальным образом (по круговым орбитам, центры штампов задаются полярными координатами), доказываемая сходимостью рядов в ИУ. Здесь существенно, что форма штампов именно круговая, поскольку используется точное решение контактной задачи Галина для кругового штампа с пригрузкой вне области контакта. Рас-

сматриваются системы инденторов разного уровня. Изучалась ПКЗ для системы сферических штампов и упругого слоя, сцепленного с упругим основанием [40]. ПКЗ о взаимодействии двухслойного упругого полупространства с системой сферических инденторов при учете трения и износа исследовалась в работе [41]. Комбинированный эффект шероховатости (система полусферических неровностей), адгезии, трения качения и скольжения при контакте проанализирован в [42] при помощи модели Можы – Дагдейла. В [43] выведено ИУ двоякопериодической контактной задачи для слоя при произвольной в плане форме штампов и применён для решения асимптотический метод, эффективный для относительно толстого слоя и относительно больших значений полупериодов. Рассматривалась ПКЗ для упругого конуса [19, 20]. Основное внимание уделено анализу особенностей контактного напряжения в вершинах клиновидных штампов, совпадающих с вершиной конуса.

Подход механики разрушения в ПКЗ восходит к работе Джонсона и соавторов [44], в которой задача Вестергаарда обобщена на случай двумерной волнистой поверхности. Для почти полного контакта, когда ширина области контакта близка к длине волны, ПКЗ разделяется на две [44]. В первой полный контакт при действии в бесконечности равномерного нормального напряжения  $p$  поддерживается растягивающими и сжимающими нормальными напряжениями. Для достижения частичного контакта растягивающие напряжения удаляются, что эквивалентно суперпозиции второй задачи о периодической системе коллинеарных сдавленных трещин. Поскольку размер трещин мал, их взаимодействие не учитывается, возникает известная задача об одной трещине в неограниченном теле [45]. При помощи КИН определяется размер трещины (длина участка вне области контакта). В [44] показано, что эта длина приближается к установленной Вестергаардом [3], когда  $p$  стремится к среднему контактному давлению при полном контакте. Подход механики разрушения был также применён к задаче упругого контакта между геометрически анизотропной бисинусоидальной поверхностью (две разные длины волны) и жестким основанием [46]. Здесь предложена трехмерная полуаналитическая модель, выведены асимптотики характеристик контакта для начального и почти полного контакта, применён подход механики разрушения. Для валидации асимптотик использованы метод быстрого преобразования Фурье и метод конечных элементов.

Ястребов и соавторы [47], используя современный численный метод (метод конечных элемен-

тов, базирующийся на быстром преобразовании Фурье), уточнили ставшие уже классическими результаты из [44] для ПКЗ об упругом контакте двумерной волнистой поверхности и полупространства, сдавливаемых от малого до полного контакта. В [47] использована сетка из  $4096 \times 4096$  узлов. Обнаружены переходные режимы, связанные с формой области контакта, исследованы периметр и компактность области контакта. Показано, что предел перколяции, равный 40,2 % (доля площади области контакта от случая полного контакта), отделяет два режима. В одном из них у плотности вероятности контактного давления возникает сингулярный пик. Установлено [47], что потеря выпуклости области контакта и последующее слияние областей контакта связаны соответственно с локальным максимумом и минимумом среднего контактного давления.

В [48] исследована трехмерная ПКЗ теории упругости для клина, когда бесконечная система одинаковых штампов расположена на одной грани клина вдоль ребра (на равном удалении от ребра, при равных промежутках между соседними штампами). К штампам приложены одинаковые нормальные вдавливающие силы, силами трения пренебрегли. Другая грань клина находится в условиях жёсткой заделки. Без ограничения общности подходов материал клина предполагался несжимаемым. Задача сведена к ИУ, из ядра которого выделена главная часть, соответствующая упругому полупространству. Изучено влияние ребра трехмерного клина на распределение контактных давлений и механические характеристики контакта. При заданных эллиптических областях контакта для решения применён регулярный асимптотический метод. При заранее неизвестных областях контакта использован метод нелинейных граничных ИУ [49]. Расчеты сделаны для эллиптических и конических штампов.

Подход работы [48] и функции Грина для клина [50] позволяют корректно поставить ПКЗ о бесконечной цепочке произвольных в плане штампов на упругом полупространстве (частный случай клина с углом  $180^\circ$ ). Если граница полупространства свободна от напряжений вне области нормального контакта, ИУ ПКЗ для цепочки штампов оказывается некорректным (ряд в ядре ИУ расходится). Однако если на граничной полуплоскости, граница которой параллельна оси цепочки штампов с полупериодом  $l$  и удалена от нее на произвольное расстояние  $c$  (рис. 1), поставить условия жесткой или скользящей заделки, ИУ ПКЗ становится корректным.

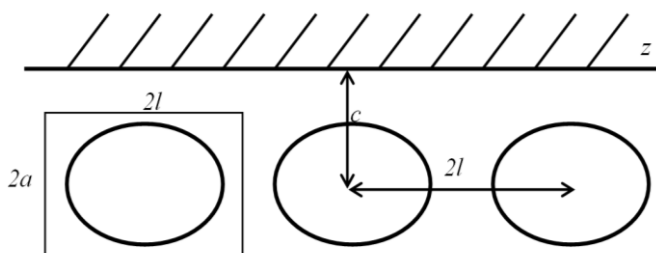


Рис. 1. Система штампов на полупространстве с закрепленной полуплоскостью / Fig. 1. System of punches on a half-space with the fixed half-plane

Используя цилиндрическую систему координат и направляя ось  $z$  вдоль линии раздела граничных условий на границе полупространства (рис. 1), при помощи интегрального преобразования Фурье – Конторовича – Лебедева для ПКЗ о цепочке (нормальный контакт) получим при учете периодичности ИУ относительно контактного давления  $q(r,z)$  соотношения

$$\iint_{\Omega} q(x,y)K(x,y,r,z)dx dy = 2\pi\theta[\delta - f(r,z)],$$

$$(r,z) \in \Omega, \quad (1)$$

$$K(x,y,r,z) = \frac{4}{\pi^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \text{sh}(\pi u) W(u) K_{iu}(tx) K_{iu}(tr) \times \\ \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} \cos(t(y + 2lk - z)) du dt. \quad (2)$$

Здесь  $\Omega$  – область контакта в рамках одного периода. Через её центр проходит полуось  $r$ ;  $\theta = G(1-\nu)$ ,  $G$  – модуль сдвига;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\delta$  – осадка штампов под действием приложенных к ним сил  $P$  (предполагается, что силы приложены с эксцентриситетом так, что перекося штампов отсутствует); функция  $f(r,z)$  описывает форму оснований штампов;

$$W(u) = \frac{\text{sh}(2\pi u)}{\text{ch}(2\pi u) + (1 + \kappa^2)/(2\kappa)} - \text{жесткая заделка};$$

$$W(u) = \text{th}(\pi u) - \text{скользящая заделка}; \quad (3)$$

$\kappa = 3 - 4\nu$ ;  $K_{iu}(x)$  – цилиндрическая функция Бесселя. При заданных значениях  $G$ ,  $\nu$ ,  $l$ ,  $\delta$ , известной функции  $f(r,z)$  требуется найти область контакта  $\Omega$ , контактное давление  $\sigma_{\varphi}(r,\pi,z) = -q(r,z)$ , силу  $P$ . Затем можно определить эксцентриситет (плечо) силы  $P$ . При помощи известной методики [43, 48] ядро (2) можно представить в форме с выделенной главной частью ( $C$  – постоянная Эйлера):

$$K(x, y, r, z) = \frac{1}{R} + \frac{1}{l} \ln \frac{|r-x|}{4l |\ln(r/x)|} + \frac{C}{l} + \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{l} \int_0^\infty \left\{ [W(u) - 1] \cos\left(u \ln \frac{r}{x}\right) + e^{-u} \right\} \frac{du}{u} +$$

$$+ \sum_{k=1}^\infty \left\{ \frac{1}{R_k^+} + \frac{1}{R_k^-} - \frac{1}{kl} \right\} + \frac{4}{\pi l} \int_0^\infty [\operatorname{sh}(\pi u) W(u) - \operatorname{ch}(\pi u)] \Sigma_u du,$$

$$R = [(r-x)^2 + (z-y)^2]^{1/2},$$

$$R_k^\pm = [(r-x)^2 + (z-y \pm 2kl)^2]^{1/2},$$

$$\Sigma_u = \sum_{k=1}^\infty K_{iu}\left(\frac{\pi k}{l} x\right) K_{iu}\left(\frac{\pi k}{l} r\right) \cos\left(\frac{\pi k}{l} (z-y)\right).$$

Отметим, что ядро (4) содержит как член, соответствующий трехмерной задаче для одного штампа ( $1/R$ ), так и член, возникающий в плоской контактной задаче [24] (первый интегральный член в правой части). Поэтому ИУ трехмерной ПКЗ сложнее ИУ плоских и пространственных задач для одного штампа. Логарифмический член в (4) содержит устранимую особенность при  $r \rightarrow x$  [48]. Для случая скользящей заделки (3) ядро (2) при помощи известных двойных интегралов [51, с. 646] можно представить в форме, свободной от квадратур:

$$K(x, y, r, z) = \frac{1}{R} - \frac{2}{\pi R} \operatorname{arctg} \frac{R}{2\sqrt{xr}} + \sum_{k=1}^\infty \left\{ \frac{1}{R_k^+} + \frac{1}{R_k^-} - \frac{2}{\pi R_k^+} \operatorname{arctg} \frac{R_k^+}{2\sqrt{xr}} - \frac{2}{\pi R_k^-} \operatorname{arctg} \frac{R_k^-}{2\sqrt{xr}} \right\}. \quad (5)$$

За счет арктангенсов ряд в (5) сходится. Если в (5) удалить слагаемые с арктангенсами, получим некорректное ядро (ряд будет расходиться) ИУ ПКЗ о цепочке штампов на полупространстве со свободной поверхностью вне области контакта. Две формы ядра (4) и (5) полностью эквивалентны для случая скользящей заделки. Для решения ИУ (1) применим метод Галанова [49], предполагая, что неизвестная область  $\Omega$  априори содержится в прямоугольнике (рис. 1), не выходящем на линию раздела граничных условий. Метод [49] позволяет одновременно определить область контакта и давление в этой области. Пусть штампы имеют форму эллиптических параболоидов,  $f(r, z) = (r-c)^2 / (2R_1) + z^2 / (2R_2)$ ,  $R_2 \geq R_1$ . Для достаточно вытянутых вдоль оси  $z$  штампов при увеличении осадки  $\delta$  область контакта расширяется и достигает вертикальных сторон прямоугольника в точках  $r=c$ ,  $z=\pm l$ , происходит смыкание дискретных областей контакта. Будем считать, что касание соседних областей контакта (начало смыкания) соответствует пределу перколяции (возникает барьер для просачивания через цепочку, рис. 2). Введем

безразмерные обозначения:  $r' = \frac{r-c}{l}$ ,  $z' = \frac{z}{l}$ ,  $\delta' = \frac{\delta}{l}$ ,  $\lambda = \frac{c}{l}$ ,  $\varepsilon = \frac{a}{l}$ ,  $P' = \frac{P}{2\pi\theta l^2}$ ,  $A = \frac{l}{2R_1}$ ,  $B = \frac{l}{2R_2}$  и т.д., штрихи далее опускаем. Расчеты выполнены для скользящей заделки при  $\varepsilon=1$ .

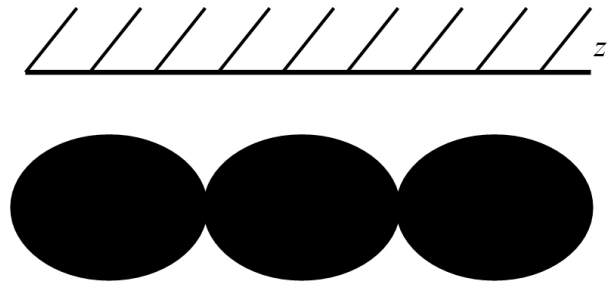


Рис. 2. Смыкание областей контакта / Fig. 2. Merge of contact zones

На рис. 3 показаны зависимости  $B(\delta)$  при  $A=1$ ,  $\lambda=2$  и  $\delta(\lambda)$  при  $A=1$ ,  $B=0,25$ , соответствующие пределу перколяции. При уменьшении  $B$  (штампы становятся более вытянутые вдоль оси  $z$ ) снижается и осадка  $\delta$ , достаточная для смыкания цепочки (рис. 3а). С увеличением  $\lambda$  (цепочка удаляется от линии раздела) требуемая для смыкания осадка возрастает (рис. 3б).

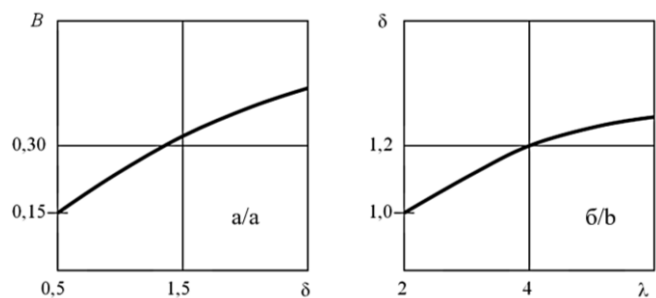


Рис. 3. Графики для предела перколяции: а –  $B(\delta)$ ; б –  $\delta(\lambda)$  / Fig. 3. Plots for the percolation limit: a -  $B(\delta)$ ; b -  $\delta(\lambda)$

На рис. 4 показаны зависимости  $P(\lambda)$  для разных значений осадки и форм оснований штампов. С ростом  $\lambda$  (при удалении цепочки от линии раздела граничных условий) значения силы снижаются, что обусловлено наличием скользящей заделки.

В таблице приведены значения силы  $P$  в зависимости от осадки  $\delta$  при разных  $\lambda$  и  $A=B=1$ . Интегральная характеристика контактных давлений  $P$  растет с увеличением  $\delta$ .

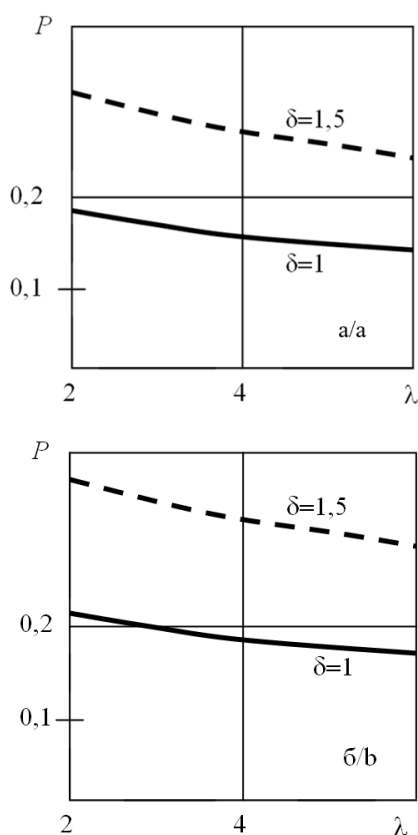


Рис. 4. Графики  $P(\lambda)$ : а –  $A=B=1$ ; б –  $A=1, B=0,5$   
/ Fig. 4. Plots of  $P(\lambda)$ : а -  $A=B=1$ ; б -  $A=1, B=0.5$

**Значения силы  $P$  / Values of the force  $P$**

$\delta$	0,5	1	1,5	2	2,5
$\lambda=2$	0,0752	0,194	0,333	0,486	0,653
$\lambda=4$	0,0660	0,165	0,276	0,397	0,524

Аналогичный подход возможен для случая периодического тангенциального контакта при сдвиге сцепленной с границей полупространства цепочки накладок вдоль или перпендикулярно оси цепочки (рис. 5). В этих задачах эллиптические накладки вытянуты в направлении, ортогональном линии действия сдвигающих сил. Поэтому можно пренебречь одним из касательных напряжений [51]. При помощи известных функций Грина для упругого полупространства [52], где решена задача для одной накладки, можно убедиться, что ИУ относительно касательного напряжения вдоль линии сдвигающих сил ПКЗ для систем накладок некорректны: ряды в ядрах расходятся. Для регуляризации ИУ достаточно закрепить границу полупространства по полуплоскости (жесткая заделка;  $r, \varphi, z$  – цилиндрические координаты, рис. 5), граница которой параллельна оси цепочки. Без ограничения общности допустим, что материал полупространства несжимаемый,  $2l$  – период ПКЗ.

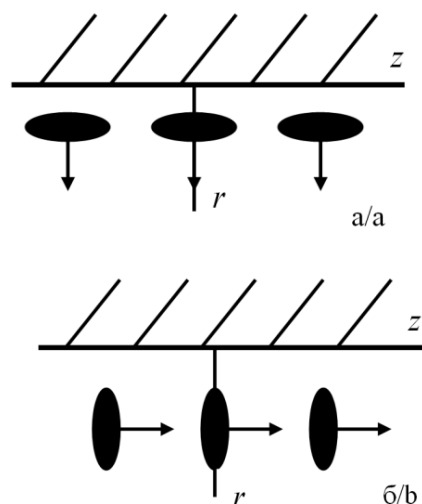


Рис. 5. Системы накладок на полупространстве с закрепленной полуплоскостью: а – сдвиг вдоль  $r$ ; б – сдвиг вдоль  $z$   
/ Fig. 5. System of coatings on a half-space with the fixed half-plane: а - shift along  $r$ ; б - shift along  $z$

Для случая сдвига накладок вдоль полуоси  $r$  (рис. 5а) функция Грина выведена в [51] (тонким моментом является выделение единственного фундаментального решения), для второго случая (рис. 5б) ИУ выводится аналогично. В результате имеем корректные ИУ указанных ПКЗ ( $n=1, 2$ ):

$$\iint_{\Omega} \tau_n(x, y) K_n(x, y, r, z) dx dy = 4\pi G \delta, (r, z) \in \Omega, \Omega$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $\delta$  – смещение накладок в направлении сдвига;  $\Omega$  – область накладки, через центр которой проходит полуось  $r$ . При сдвиге вдоль  $r$  искомое напряжение  $\tau_1(r, z) = \tau_{r\varphi}(r, z)$ ,

$$K_1(x, y, r, z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \left( \frac{1}{R_k} + \frac{(r-x)^2}{R_k^3} \right) \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \frac{R_k}{2\sqrt{xr}} \right) - \frac{4\sqrt{xr}z_k^2}{\pi R_k^2 [(r+x)^2 + z_k^2]} \right\}, \quad (6)$$

$$z_k = z - y + 2kl, R_k = \sqrt{(r-x)^2 + z_k^2}.$$

При сдвиге вдоль  $z$  искомое напряжение  $\tau_2(r, z) = \tau_{\varphi z}(r, z)$ ,

$$K_2(x, y, r, z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \left( \frac{1}{R_k} + \frac{z_k^2}{R_k^3} \right) \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \frac{R_k}{2\sqrt{xr}} \right) + \frac{4\sqrt{xr}z_k^2}{\pi R_k^2 [(r+x)^2 + z_k^2]} \right\}. \quad (7)$$

Если в формулах (6) и (7) убрать слагаемые с арктангенсами и последние дроби, возникнут расходящиеся ряды, соответствующие известным функциям Грина для несжимаемого полупространства [52].

Рассматривалась ПКЗ для неоднородного слоя с переменным по глубине коэффициентом Пуассона [53]. Одна грань слоя находится в условиях скользящей заделки, другая контактирует с периодической цепочкой штампов, расположенных вдоль одной из осей координат. В предположении, что область контакта неизвестна, для решения ИУ использован метод Галанова [49].

Двоякопериодические задачи о системах трещин, расположенных в плоскости неограниченного упругого тела, изучены в монографии [52] при помощи регулярного асимптотического метода. Этот же метод применён для задач о периодических цепочках эллиптических трещин, расположенных в срединной полуплоскости трехмерного упругого однородного [54] или составного [55] клина (вдоль ребра клина), а также в срединной плоскости упругого слоя при четырех типах граничных условий на гранях слоя [56]. В задачах [54–56] возникают два независимых безразмерных геометрических параметра. Предполагается линейная связь между ними. В результате решение ИУ представляется в виде асимптотического разложения только по одному параметру. Решения оказываются эффективными при относительно больших значениях полупериода, а также для относительно удаленных от ребра клина цепочек [54, 55] или для относительно толстых слоев [56]. Произведен расчет КИН [54–56]. Для случая скользящей заделки граней слоя [56] задача эквивалентна системе параллельных периодических цепочек в упругом пространстве. Показано, что при сближении параллельных цепочек КИН уменьшается, т.е. трещины начинают мешать друг другу распространяться (известны аналогичные выводы в других задачах [35, 45]). Рассмотрены задачи о периодических цепочках эллиптических трещин, ориентированных вдоль одной из осей координат, лежащих в плоскости, которая перпендикулярна плоскостям изотропии трансверсально изотропного упругого неограниченного тела [57]. Для решения ИУ использован регулярный асимптотический метод с введением безразмерного параметра, характеризующего относительную удаленность соседних трещин друг от друга. Границы применимости метода зависят от параметров анизотропии и расположения трещин. Получены асимптотики КИН, отнесенного к случаю одной трещины. Голуб и соавторы [58] изучили распространение волн в упругом биматериале, когда на границе раздела имеется двоякопериодический

массив прямоугольных трещин. При помощи метода граничных ИУ исследовано влияние формы трещин и решетки периодического массива на прохождение волн через границу раздела. Обнаружено возрастание трансмиссионной энергии упругих волн по сравнению со случаем отсутствия трещин.

## Заключение

Перспективные направления исследования ПКЗ и ПСЗ – трехмерные задачи, применение современных численных методов и аналитических моделей, учет сложных явлений в области контакта (адгезия, трение, износ), усложнение геометрии взаимодействующих тел. Для прямолинейных периодических систем инденторов и накладок произвольной формы в плане на упругом полупространстве метод закрепления части упругой поверхности позволяет получить корректные ИУ.

## Литература

1. Popov V.L., Heß M. Method of dimensionality reduction in contact mechanics and friction. Berlin: Springer, 2015. 265 p. Doi 10.1007/978-3-642-53876-6.
2. Barber J.R. Contact mechanics. Berlin: Springer, 2018. 585 p. Doi 10.1007/978-3-319-70939-0.
3. Westergaard H.M. Bearing pressure and cracks // ASME. J. Appl. Mech. E. 1939. Vol. 6, № 1. P. 43–53.
4. Dundurs J., Tsai K.C., Keer L.M. Contact between elastic bodies with wavy surfaces // J. Elasticity. 1973. Vol. 3, № 2. P. 109–115. Doi 10.1007/bf00045817.
5. Kuznetsov E.A. Periodic fundamental mixed problem of elastic theory for a half-space // Soviet Appl. Mech. 1976. Vol. 12, № 9. P. 942–948.
6. Kuznetsov E.A. Periodic contact problem for half-plane allowing for forces of friction // Soviet Appl. Mech. 1976. Vol. 12, № 10. P. 1014–1019.
7. Kuznetsov Y.A., Gorokhovskiy G.A. Stress distribution in a polymeric material subjected to the action of a rough-surface indenter // Wear. 1978. Vol. 51, № 2. P. 299–308.
8. Manners W. Partial contact between elastic surfaces with periodic profiles // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1998. Vol. 454, № 1980. P. 3203–3221. Doi 10.1098/rspa.1998.0298.
9. Cai H., Lu J. Mathematical theory in periodic plane elasticity. Amsterdam: Gordon and Breach Sci. Publ., 2000. 168 p.
10. Goryacheva I.G., Malanchuk N.I., Martynyak R.M. Contact interaction of bodies with a periodic relief during partial slip // J. Appl. Math. Mech. 2012. Vol. 76, № 5. P. 621–630. Doi 10.1016/j.jappmathmech.2012.11.002.
11. Slobodyan B.S., Lyashenko B.A., Malanchuk N.I., Marchuk V.E., Martynyak R.M. Modeling of contact interaction of periodically textured bodies with regard for

- frictional slip // *J. Math. Sci.* 2016. Vol. 215, № 1. P. 110–120. Doi 10.1007/s10958-016-2826-x.
12. *Adams G.G.* Adhesion at the wavy contact interface between two elastic bodies // *ASME J. Appl. Mech.* 2004. Vol. 71, № 6. P. 851–856. Doi 10.1115/1.1794702.
13. *Штаерман И.Я.* Контактная задача теории упругости. М.; Л.: ГИТТЛ, 1949. 270 с.
14. *Block J.M., Keer L.M.* Periodic contact problems in plane elasticity // *J. Mech. Materials and Struct.* 2008. Vol. 3, № 7. P. 1207–1237. Doi 10.2140/jomms.2008.3.1207.
15. *Soldatenkov I.A.* The periodic contact problem of the plane theory of elasticity. Taking friction, wear and adhesion into account // *J. Appl. Math. Mech.* 2013. Vol. 77, № 2. P. 245–255. Doi 10.1016/j.jappmathmech.2013.07.017.
16. *Tsukanov I.Y.* Effects of shape and scale in mechanics of elastic interaction of regular wavy surfaces // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J.* 2017. Vol. 231, № 3. P. 332–340. Doi 10.1177/1350650116657699.
17. *Burnaeva V.V., Romanenko L.G.* A periodic problem for the indentation of a system of elastic half-strips into a strip // *Mech. Solids.* 1999. Vol. 34, № 6. P. 9–16.
18. *Величко Е.В., Приварников А.К.* Плоская периодическая контактная задача для упругой многослойной плиты // *Динамические системы : межведомств. науч. сб. Симферополь: Таврический нац. ун-т им. В.И. Вернадского, 2007. Вып. 23. С. 3–10.*
19. *Александров В.М., Пожарский Д.А.* Неклассические пространственные задачи механики контактных взаимодействий упругих тел. М.: Факториал, 1998. 288 с.
20. *Alexandrov V.M., Pozharskii D.A.* Three-dimensional contact problems. Dordrecht: Kluwer, 2001. 406 p.
21. *Александров В.М., Чебаков М.И.* Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. М.: Физматлит, 2004. 304 с.
22. *Кучеров Л.В., Чебаков М.И.* Контактная обобщенно периодическая задача теории упругости для кольца // *Изв. АН СССР. МТТ.* 1991. № 4. С. 111–118.
23. *Aleksandrov V.M., Mark A.V.* Quasistatic periodic contact problem for a viscoelastic layer, a cylinder and a half-space with cylindrical cavity // *J. Appl. Mech. Tech. Physics.* 2009. Vol. 50, iss. 5. P. 866–871. Doi 10.1007/s10808-009-0117-8.
24. *Александров В.М., Коваленко Е.В.* Задачи механики сплошных сред со смешанными граничными условиями. М.: Наука, 1986. 336 с.
25. *Xu Y., Jackson R.L.* Periodic contact problems in plane elasticity: the fracture mechanics approach // *ASME J. Trib.* 2018. Vol. 140, № 1. P. 011404. Doi 10.1115/1.4036920.
26. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
27. *Горячева И.Г.* Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
28. *Jin F., Guo X., Wan Q.* Revisiting the Maugis-Dugdale adhesion model of elastic periodic wavy surfaces // *ASME J. Appl. Mech.* 2016. Vol. 83, № 10. P. 101007. Doi 10.1115/1.4034119.
29. *Jin F., Wan Q., Guo X.* A double-Westergaard model for adhesive contact of a wavy surface // *Int. J. Solids Struct.* 2016. Vol. 102–103. P. 66–76. Doi 10.1016/j.ijsolstr.2016.10.016.
30. *Александров В.М.* Периодическая контактная задача для упругого слоя с учетом трения и износа // *Современные проблемы механики сплошной среды. Ростов н/Д.: МП Книга, 1995. С. 14–18.*
31. *Nosonovsky M., Adams G.G.* Steady-state frictional sliding of two elastic bodies with a wavy contact interface // *ASME J. Tribol.* 2000. Vol. 122, № 3. P. 490–495. Doi 10.1115/1.555391.
32. *Greenwood J.A.* On the almost-complete contact of elastic rough surfaces: The removal of tensile patches // *Int. J. Solids Struct.* 2015. Vol. 56–57. P. 258–264. Doi 10.1016/j.ijsolstr.2014.10.025.
33. *Goryacheva I.G., Tsukanov I.Y.* Modeling of normal contact of elastic bodies with surface relief taken into account // *J. Physics: Conf. Series.* 2018. Vol. 991, № 1. P. 012028. Doi 10.1088/1742-6596/991/1/012028.
34. *Саврук М.П.* Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. Киев: Наукова думка, 1981. 324 с.
35. *Schmueser D., Comninou M.* The periodic array of interface cracks and their interaction // *Int. J. Solids Struct.* 1979. Vol. 15, № 12. P. 927–934.
36. *Iovane G., Sumbatyan M.A.* Periodic system of collinear cracks in an elastic porous medium // *Mech. Solids.* 2009. Vol. 44, № 3. P. 79–88. Doi 10.3103/S0025654409030091.
37. *Осинов Е.А., Плещинская Е.А., Плещинский Н.Б.* Упругие свойства слоистого композита, ослабленного периодической системой трещин // *Вестн. Казанского технол. ун-та.* 2012. Т. 15, № 3. С. 82–84.
38. *Goryacheva I.G.* Contact mechanics in tribology. Dordrecht: Kluwer, 1998. 344 p.
39. *Goryacheva I.G.* The periodic contact problem for an elastic half-space // *J. Appl. Math. Mech.* 1998. Vol. 62, № 6. P. 959–966.
40. *Горячева И.Г., Торская Е.В.* Периодическая контактная задача для системы штампов и упругого слоя, сцепленного с упругим основанием // *Трение и износ.* 1995. Т. 16, № 4. С. 642–652.
41. *Goryacheva I.G., Torskaya E.V.* Modeling of fatigue wear of a two-layered elastic half-space in contact with periodic system of indenters // *Wear.* 2010. Vol. 268, № 11–12. P. 1417–1422. Doi 10.1016/j.wear.2010.02.018.
42. *Goryacheva I.G., Makhovskaya Y.* Combined effect of surface microgeometry and adhesion in normal and sliding contacts of elastic bodies // *Friction.* 2017. Vol. 5, № 3. P. 339–350. Doi 10.1007/s40544-017-0179-1.
43. *Aleksandrov V.M.* Doubly periodic contact problems for and elastic layer // *J. Appl. Math. Mech.* 2002. Vol. 66, № 2. P. 297–305.
44. *Johnson K., Greenwood J., Higginson J.* The contact of elastic regular wavy surfaces // *Int. J. Mech. Sci.*

1985. Vol. 27, № 6. P. 383–396. Doi 10.1016/0020-7403(85)90029-3.

45. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие в 4 т. Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / под общ. ред. В.В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1988. 620 с.

46. Xu Y., Rostami A., Jackson R.L. Elastic contact between a geometrically-anisotropic bisinusoidal surface and a rigid base // *ASME J. Tribol.* 2015. Vol. 137, № 2. P. 021402. Doi 10.1177/1350650116657699.

47. Yastrebov V.A., Anciaux G., Molinari J.-F. The contact of elastic regular wavy surfaces revisited // *Tribol. Lett.* 2014. Vol. 56. P. 171–183. Doi 10.1007/s11249-014-0395-z.

48. Pozharskii D.A. Periodic contact problem for an elastic wedge // *J. Appl. Math. Mech.* 2015. Vol. 79, № 6. P. 604–610. Doi 10.1016/j.jappmathmech.2016.04.007.

49. Galanov B.A. The method of boundary equations of the Hammerstein-type for contact problems of the theory of elasticity when the regions of contact are not known // *J. Appl. Math. Mech.* 1985. Vol. 49, № 5. P. 634–640.

50. Пожарский Д.А. Фундаментальные решения статики упругого клина и их приложения. Ростов н/Д.: ДГТУ-Принт, 2019. 312 с.

51. Пожарский Д.А. К одной задаче Я.С. Уфлянда // *ПММ.* 2019. Т. 83, № 4. С. 643–652. Doi 10.1134/S0032823519040106.

52. Александров В.М., Сметанин Б.И., Соболев Б.В. Тонкие концентраторы напряжений в упругих телах. М.: Наука, 1993. 224 с.

53. Пожарский Д.А., Бедоидзе М.В., Пожарская Е.Д. Периодические контактные задачи для слоя // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки.* 2019. № 1. С. 30–32. Doi 10.23683/0321-3005-2019-1-30-32.

54. Pozharskii D.A. Periodic crack system in an elastic wedge // *Mech. Solids.* 2018. Vol. 53, suppl. 1. P. 137–145. Doi 10.3103/S0025654418030123.

55. Pozharskii D.A., Sobol B.V., Vasiliev P.V. Periodic crack system in a layered elastic wedge // *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2020. Vol. 27, iss. 4. P. 318–324. Doi 10.1080/15376494.2018.1472346.

56. Pozharskii D.A., Sobol B.V., Vasiliev P.V. Periodic crack problems for an elastic layer // *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2020. P. 1–9. Doi 10.1080/15376494.2020.1776430.

57. Pozharskii D.A. Periodic crack systems in a transversely isotropic body // *Mech. Solids.* 2019. Vol. 54, № 4. P. 533–540. Doi 10.3103/S0025654419040058.

58. Golub M.V., Doroshenko O.V., Fomenko S.I., Zhang C. Wave propagation in elastic bimetals with a doubly periodic array of interface cracks // *J. Physics: Conf. Series.* 2020. Vol. 1461. P. 012051. Doi 10.1088/1742-6596/1461/1/012051.

## References

1. Popov V.L., Heß M. (2015). *Method of dimensionality reduction in contact mechanics and friction.* Berlin, Springer, 265 p. Doi 10.1007/978-3-642-53876-6.

2. Barber J.R. (2018). *Contact mechanics.* Berlin, Springer, 585 p. Doi 10.1007/978-3-319-70939-0.

3. Westergaard H.M. (1939). Bearing pressure and cracks. *ASME. J. Appl. Mech. E*, vol. 6, No. 1, pp. 43–53.

4. Dundurs J., Tsai K.C., Keer L.M. (1973). Contact between elastic bodies with wavy surfaces. *J. Elasticity*, vol. 3, No. 2, pp. 109–115. Doi 10.1007/bf00045817.

5. Kuznetsov E.A. (1976). Periodic fundamental mixed problem of elastic theory for a half-space. *Soviet Appl. Mech.*, vol. 12, No. 9, pp. 942–948.

6. Kuznetsov E.A. (1976). Periodic contact problem for half-plane allowing for forces of friction. *Soviet Appl. Mech.*, vol. 12, No. 10, pp. 1014–1019.

7. Kuznetsov Y.A., Gorokhovskiy G.A. (1978). Stress distribution in a polymeric material subjected to the action of a rough-surface indenter. *Wear*, vol. 51, No. 2, pp. 299–308.

8. Manners W. (1998). Partial contact between elastic surfaces with periodic profiles. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, vol. 454, No. 1980, pp. 3203–3221. Doi 10.1098/rspa.1998.0298.

9. Cai H., Lu J. (2000). *Mathematical theory in periodic plane elasticity.* Amsterdam, Gordon and Breach Sci. Publ., 168 p.

10. Goryacheva I.G., Malanchuk N.I., Martynyak R.M. (2012). Contact interaction of bodies with a periodic relief during partial slip. *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 76, No. 5, pp. 621–630. Doi 10.1016/j.jappmathmech.2012.11.002.

11. Slobodyan B.S., Lyashenko B.A., Malanchuk N.I., Marchuk V.E., Martynyak R.M. (2016). Modeling of contact interaction of periodically textured bodies with regard for frictional slip. *J. Math. Sci.*, vol. 215, No. 1, pp. 110–120. Doi 10.1007/s10958-016-2826-x.

12. Adams G.G. (2004). Adhesion at the wavy contact interface between two elastic bodies. *ASME J. Appl. Mech.*, vol. 71, No. 6, pp. 851–856. Doi 10.1115/1.1794702.

13. Shtaerman I.Ya. (1949). *Contact problem in the elasticity theory.* Moscow, Leningrad, GITTL Publ., 270 p. (in Russian).

14. Block J.M., Keer L.M. (2008). Periodic contact problems in plane elasticity. *J. Mech. Materials and Struct.*, vol. 3, No. 7, pp. 1207–1237. Doi 10.2140/jomms.2008.3.1207.

15. Soldatenkov I.A. (2013). The periodic contact problem of the plane theory of elasticity. Taking friction, wear and adhesion into account. *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 77, No. 2, pp. 245–255. Doi 10.1016/j.jappmathmech.2013.07.017.

16. Tsukanov I.Y. (2017). Effects of shape and scale in mechanics of elastic interaction of regular wavy surfaces. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J.*, vol. 231, No. 3, pp. 332–340. Doi 10.1177/1350650116657699.

17. Burnaeva V.V., Romanenko L.G. (1999). A periodic problem for the indentation of a system of elastic half-strips into a strip. *Mech. Solids.*, vol. 34, No. 6, pp. 9-16.
18. Velichko E.V., Privarnikov A.K. (2007). Plane periodic contact problem for an elastic multilayered plate. *Dynamic systems*. Interdepartmental Scientific Collection. Simferopol, Vernadsky Tavrida National University Press, iss. 23, pp. 3-10. (in Russian).
19. Aleksandrov V.M., Pozharskii D.A. (1998). *Non-classical spatial problems of elastic solids contact interactions mechanics*. Moscow, Faktorial Publ., 288 p. (in Russian).
20. Alexandrov V.M., Pozharskii D.A. (2001). *Three-dimensional contact problems*. Dordrecht, Kluwer, 406 p.
21. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. (2004). *Analytical methods in contact problem of the elasticity theory*. Moscow, Fizmatlit Publ., 304 p. (in Russian).
22. Kucherov L.V., Chebakov M.I. (1991). Generalized periodic contact problem of the elasticity theory for a ring. *Izvestiya AN SSSR. MTT*, No. 4, pp. 111-118. (in Russian).
23. Aleksandrov V.M., Mark A.V. (2009). Quasistatic periodic contact problem for a viscoelastic layer, a cylinder and a half-space with cylindrical cavity. *J. Appl. Mech. Tech. Physics*, vol. 50, iss. 5, pp. 866-871. Doi 10.1007/s10808-009-0117-8.
24. Aleksandrov V.M., Kovalenko E.V. (1986). *Problems with mixed boundary conditions in continuum mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 336 p. (in Russian).
25. Xu Y., Jackson R.L. (2018). Periodic contact problems in plane elasticity: the fracture mechanics approach. *ASME J. Tribol.*, vol. 140, No. 1, p. 011404. Doi 10.1115/1.4036920.
26. Johnson K. (1989). *Mechanics of contact interaction*. Moscow, Mir Publ., 510 p. (in Russian).
27. Goryacheva I.G. (2001). *Mechanics of frictional interaction*. Moscow, Nauka Publ., 478 p. (in Russian).
28. Jin F., Guo X., Wan Q. (2016). Revisiting the Maugis-Dugdale adhesion model of elastic periodic wavy surfaces. *ASME J. Appl. Mech.*, vol. 83, No. 10, p. 101007. Doi 10.1115/1.4034119.
29. Jin F., Wan Q., Guo X. (2016). A double-Westergaard model for adhesive contact of a wavy surface. *Int. J. Solids Struct.*, vol. 102-103, pp. 66-76. Doi 10.1016/j.ijsolstr.2016.10.016.
30. Aleksandrov V.M. (1995). Periodic contact problems for an elastic layer taking friction and wear into account. *Modern problems of continuum mechanics*. Rostov-on-Don, MP Kniga Publ., pp. 14-18. (in Russian).
31. Nosonovsky M., Adams G.G. (2000). Steady-state frictional sliding of two elastic bodies with a wavy contact interface. *ASME J. Tribol.*, vol. 122, No. 3, pp. 490-495. Doi 10.1115/1.555391.
32. Greenwood J.A. (2015). On the almost-complete contact of elastic rough surfaces: The removal of tensile patches. *Int. J. Solids Struct.*, vol. 56-57, pp. 258-264. Doi 10.1016/j.ijsolstr.2014.10.025.
33. Goryacheva I.G., Tsukanov I.Y. (2018). Modeling of normal contact of elastic bodies with surface relief taken into account. *J. Physics: Conf. Series*, vol. 991, No. 1, p. 012028. Doi 10.1088/1742-6596/991/1/012028.
34. Savruk M.P. (1981). *Two-dimensional elasticity problems for bodies with cracks*. Kiev, Naukova dumka Publ., 324 p. (in Russian).
35. Schmueser D., Comninou M. (1979). The periodic array of interface cracks and their interaction. *Int. J. Solids Struct.*, vol. 15, No. 12, pp. 927-934.
36. Iovane G., Sumbatyan M.A. (2009). Periodic system of collinear cracks in an elastic porous medium. *Mech. Solids*, vol. 44, No. 3, pp. 79-88. Doi 10.3103/S0025654409030091.
37. Osipov E.A., Pleschinskaya E.A., Pleschinskii N.B. (2012). Elastic properties of a layered composite weakened by a periodic crack system. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, vol. 15, No. 3, pp. 82-84. (in Russian).
38. Goryacheva I.G. (1998). *Contact mechanics in tribology*. Dordrecht, Kluwer, 344 p.
39. Goryacheva I.G. (1998). The periodic contact problem for an elastic half-space. *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 62, No. 6, pp. 959-966.
40. Goryacheva I.G., Torskaya E.V. (1995). Periodic contact problem for a punch system and an elastic layer cohesive with an elastic base. *Trenie i iznos*, vol. 16, No. 4, pp. 642-652. (in Russian).
41. Goryacheva I.G., Torskaya E.V. (2010). Modeling of fatigue wear of a two-layered elastic half-space in contact with periodic system of indenters. *Wear*, vol. 268, No. 11-12, pp. 1417-1422. Doi 10.1016/j.wear.2010.02.018.
42. Goryacheva I.G., Makhovskaya Y. (2017). Combined effect of surface microgeometry and adhesion in normal and sliding contacts of elastic bodies. *Friction*, vol. 5, No. 3, pp. 339-350. Doi 10.1007/s40544-017-0179-1.
43. Aleksandrov V.M. (2002). Doubly periodic contact problems for an elastic layer. *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 66, No. 2, pp. 297-305.
44. Johnson K., Greenwood J., Higginson J. (1985). The contact of elastic regular wavy surfaces. *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 27, No. 6, pp. 383-396. Doi 10.1016/0020-7403(85)90029-3.
45. *Fracture mechanics and strength of materials*. (1988). Handbook in 4 vol., vol. 2. Stress intensity factors for solids with cracks. V.V. Panasyuk (Ed.), Kiev, Naukova dumka Publ., 620 p. (in Russian).
46. Xu Y., Rostami A., Jackson R.L. (2015). Elastic contact between a geometrically-anisotropic bisinusoidal surface and a rigid base. *ASME J. Tribol.*, vol. 137, No. 2, p. 021402. Doi 10.1177/1350650116657699.
47. Yastrebov V. A., Anciaux G., Molinari J.-F. (2014). The contact of elastic regular wavy surfaces revisited. *Tribol. Lett.*, vol. 56, pp. 171-183. Doi 10.1007/s11249-014-0395-z.
48. Pozharskii D.A. (2015). Periodic contact problem for an elastic wedge. *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 79, No. 6, pp. 604-610. Doi 10.1016/j.jappmathmech.2016.04.007.

49. Galanov B.A. (1985). The method of boundary equations of the Hammerstein-type for contact problems of the theory of elasticity when the regions of contact are not known. *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 49, No. 5, pp. 634-640.
50. Pozharskii D.A. (2019). *Fundamental solutions of the elastic wedge statics and applications*. Rostov-on-Don, DGTU-Print Publ., 312 p. (in Russian).
51. Pozharskii D.A. (2019). To one Ya.S. Uflyand's problem. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, vol. 83, No. 4, pp. 643-652. Doi 10.1134/S0032823519040106. (in Russian).
52. Aleksandrov V.M., Smetanin B.I., Sobol B.V. (1993). *Thin stress concentrators in elastic solids*. Moscow, Nauka Publ., 224 p. (in Russian).
53. Pozharskii D.A., Bedoidze M.V., Pozharskaya E.D. (2019). Periodic contact problems for a layer. *Izvestiya vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 1, pp. 30-32. Doi 10.23683/0321-3005-2019-1-30-32. (in Russian).
54. Pozharskii D.A. (2018). Periodic crack system in an elastic wedge. *Mech. Solids*, vol. 53, suppl. 1, pp. 137-145. Doi 10.3103/S0025654418030123.
55. Pozharskii D.A., Sobol B.V., Vasiliev P.V. (2020). Periodic crack system in a layered elastic wedge. *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 27, iss. 4, pp. 318-324. Doi 10.1080/15376494.2018.1472346.
56. Pozharskii D.A., Sobol B.V., Vasiliev P.V. (2020). Periodic crack problems for an elastic layer. *Mech. Adv. Mater. Struct.*, pp. 1-9. Doi 10.1080/15376494.2020.1776430.
57. Pozharskii D.A. (2019). Periodic crack systems in a transversely isotropic body. *Mech. Solids*, vol. 54, No. 4, pp. 533-540. Doi 10.3103/S0025654419040058.
58. Golub M.V., Doroshenko O.V., Fomenko S.I., Zhang C. (2020). Wave propagation in elastic bimetals with a doubly periodic array of interface cracks. *J. Physics: Conf. Series*, vol. 1461, p. 012051. Doi 10.1088/1742-6596/1461/1/012051.

---

*Поступила в редакцию / Received*

*30 января 2021 г. / January 30, 2021*

УДК 517.547.7, 517.98

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-34-41

## О ПЛОТНОСТИ МНОГОЧЛЕНОВ В СПЕЦИАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ЦЕЛЫХ ФУНКЦИЙ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА

© 2021 г. А.А. Татаркин<sup>1</sup><sup>1</sup>Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

## THE DENSITY OF POLYNOMIALS IN A SPECIAL SPACE OF ENTIRE FUNCTIONS OF EXPONENTIAL TYPE

А.А. Татаркин<sup>1</sup><sup>1</sup>Kuban State University, Krasnodar, Russia

Татаркин Александр Александрович – аспирант, кафедры теории функций, факультет математики и компьютерных наук, Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Россия, e-mail: tiamatory@gmail.com.

Aleksandr A. Tatarkin - Postgraduate, Department of Function Theory, Faculty of Mathematics and Computer Sciences, Kuban State University, Stavropolskaya St., 149, Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: tiamatory@gmail.com.

Традиционный подход к решению конкретной задачи спектрального синтеза в комплексной области предполагает сведение ее к задаче локального описания замкнутых подмодулей в некотором пространстве целых функций. Последняя задача расщепляется на проверку устойчивости и насыщенности исследуемого подмодуля. Такой подход оказался очень эффективным, например, при исследовании подмодулей локального ранга 1 и при исследовании подмодулей в топологических модулях, ассоциированных с неограниченными выпуклыми областями.

Последние исследования по спектральному синтезу в комплексной области опираются на другую схему. Эта схема предполагает сведение задачи локального описания к проверке плотности многочленов в специальном модуле целых функций экспоненциального типа. При этом исследуемое пространство является отдельным локально выпуклым пространством типа  $(LN)^*$ . Полиномиальная аппроксимация в таком пространстве понимается нами как секвенциальная аппроксимация, т.е. речь идет о приближении элементов пространства обычными (не обобщенными) последовательностями полиномов. Исследован специальный локально выпуклый модуль целых векторных функций над кольцом многочленов от степени независимой переменной. Доказанная в статье теорема может служить источником новых результатов по спектральному синтезу в комплексной области.

**Ключевые слова:** спектральный синтез, локальное описание, полиномиальная аппроксимация, факторизация целых функций.

The traditional approach to solving a specific problem of spectral synthesis in a complex domain involves reducing it to the problem of local description of closed submodules in a certain space of entire functions. The last problem is split into checking the stability and saturation of the submodule under study. This approach turned out to be very effective, for example, in the study of submodules of local rank 1 and in the study of submodules in topological modules associated with unbounded convex domains.

Recent studies on spectral synthesis in the complex domain are based on a different scheme. This scheme involves reducing the problem of local description to checking the density of polynomials in a special module of entire functions of exponential type. Moreover, the space under study is a separable locally convex space of type  $(LN)^*$ . Polynomial approximation in such a space is understood by us as sequential approximation, that is, we are talking about the approximation of space elements by ordinary (not generalized) sequences of polynomials. In this article, we study a special locally convex module of entire vector functions over the ring of polynomials in the degree of the independent variable. The theorem proved in the article can serve as a source of new results on spectral synthesis in the complex domain.

**Keywords:** spectral synthesis, local description, polynomial approximation, factorization of entire functions.

### Введение

Пусть  $\Omega$  – выпуклая область в комплексной плоскости  $\mathbb{C}$ ;  $H_\Omega$  – опорная функция области  $\Omega$  в смысле комплексного анализа;  $P := P(\Omega)$  – индуктивный предел  $P[1, H_\Omega]$  [1]. Известно, что локально выпуклое пространство  $P(\Omega)$  изоморфно сильному сопряженному пространству  $O^*(\Omega)$  и является пространством типа  $(LN)^*$ . Выберем произвольное натуральное  $q$  и произвольное семейство  $\mathbf{n}$  целых чисел  $n_1, \dots, n_\nu$ , удовлетворяющих неравенствам  $0 \leq n_1 < \dots < n_\nu \leq q-1$ . Векторную функцию  $\mathbf{g} := (g_1, \dots, g_\nu)$  называем целой  $\nu$ -функцией, если все функции  $g_1, \dots, g_\nu$  являются целыми. Если целые функции  $g_1, \dots, g_\nu$  являются полиномами, то целую  $\nu$ -функцию  $\mathbf{g} := (g_1, \dots, g_\nu)$  называем  $\nu$ -полиномом. Выберем произвольную функцию  $\varphi \in P(\Omega)$  и обозначим  $\mathbf{O}_\varphi$  пространство всех целых  $\nu$ -функций  $\mathbf{g} := (g_1, \dots, g_\nu)$ , для которых сумма  $z^{n_1} g_1(z^q) \varphi(z) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z^q) \varphi(z)$  принадлежит  $P(\Omega)$ . Определим отображение  $\mathbf{u}_\varphi : \mathbf{O}_\varphi \rightarrow P(\Omega)$  по правилу

$$\mathbf{g} \rightarrow z^{n_1} g_1(z^q) \varphi(z) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z^q) \varphi(z). \quad (1)$$

По (1) отображение  $\mathbf{u}_\varphi$  является взаимно однозначным. Наделим  $\mathbf{O}_\varphi$  локально выпуклой топологией, индуцированной из пространства  $P(\Omega)$  отображением  $\mathbf{u}_\varphi$ . Так как  $\varphi \in P(\Omega)$  и оператор умножения на многочлен является эндоморфизмом пространства  $P(\Omega)$ , то пространство  $\mathbf{O}_\varphi$  включает в себя все  $\nu$ -полиномы. Принципиальное значение имеет вопрос плотности множества всех  $\nu$ -полиномов в пространстве  $\mathbf{O}_\varphi$ .

Семейство  $\mathbf{n} := \{n_1, \dots, n_\nu\}$  называем индикатором пространства  $\mathbf{O}_\varphi$ . Пусть  $n_{\nu+1} := q + n_1$ . Говорим, что индикатор  $\mathbf{n}$  пространства  $\mathbf{O}_\varphi$  является периодичным, если выполняются равенства

$$n_2 - n_1 = n_3 - n_2 = \dots = n_{\nu+1} - n_\nu.$$

В данной статье доказана следующая

**Теорема 1.** Если индикатор  $\mathbf{n}$  пространства  $\mathbf{O}_\varphi$  является периодичным, то  $\nu$ -полиномы плотны в пространстве  $\mathbf{O}_\varphi$ .

Теорема 1 имеет прямое отношение к задаче локального описания замкнутых подмодулей в пространстве  $P(\Omega)$  над кольцом  $\mathbb{C}[z^q]$  многочленов от  $z^q$ . Эта связь установлена в работе [2]. Замкнутые  $\mathbb{C}[z^q]$ -подмодули в пространстве  $P(\Omega)$  исследовались неоднократно [1, 3–8]. Получен ряд общих и промежуточных результатов, но известные законченные результаты по локальному описанию относятся, как правило, к подмодулям локального ранга 1. Исключение составляет лишь случай неограниченной выпуклой области  $\Omega$ . В этой ситуации законченных результатов существенно больше [9]. Доказанная теорема может быть использована при исследовании замкнутых полиномиальных оболочек систем функций вида  $z^{n_1} \varphi, \dots, z^{n_\nu} \varphi$  в пространстве  $P(\Omega)$ . Их локальный ранг равен  $\nu \geq 1$ . Это означает, что теорема 1 может служить источником новых результатов по локальному описанию и спектральному синтезу в комплексной области [10].

### Независимое описание топологии пространства $\mathbf{O}_\varphi$

*Взаимная однозначность отображения  $\mathbf{u}_\varphi$ .* При определении пространства  $\mathbf{O}_\varphi$  существенную роль играет взаимная однозначность отображения  $\mathbf{u}_\varphi : \mathbf{O}_\varphi \rightarrow P(\Omega)$ , определяемого по правилу (1). Этот факт не является тривиальным. Приведем его доказательство.

**Предложение 1.** Отображение  $\mathbf{u}_\varphi : \mathbf{O}_\varphi \rightarrow P(\Omega)$  является взаимно однозначным.

*Доказательство.* Пусть  $\mathbf{g}^{(1)} := (g_1^{(1)}, \dots, g_\nu^{(1)})$  и  $\mathbf{g}^{(2)} := (g_1^{(2)}, \dots, g_\nu^{(2)})$  принадлежат  $\mathbf{O}_\varphi$  и  $\mathbf{u}_\varphi(\mathbf{g}^{(1)}) = \mathbf{u}_\varphi(\mathbf{g}^{(2)})$ . Тогда вне множества нулей целой функции  $\varphi$  выполняются равенства

$$\begin{aligned} z^{n_1} g_1^{(1)}(z^q) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu^{(1)}(z^q) &= \\ &= z^{n_1} g_1^{(2)}(z^q) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu^{(2)}(z^q), \\ z^{n_1} (g_1^{(1)}(z^q) - g_1^{(2)}(z^q)) + \dots + z^{n_\nu} (g_\nu^{(1)}(z^q) - g_\nu^{(2)}(z^q)) &= 0. \end{aligned}$$

При этом для целых функций

$$g_1(z) := g_1^{(1)}(z^q) - g_1^{(2)}(z^q), \dots,$$

$$g_\nu(z) := g_\nu^{(1)}(z^q) - g_\nu^{(2)}(z^q)$$

справедливы соотношения

$$g_1(\omega_q^k z) = g_1(z), \dots, g_\nu(\omega_q^k z) = g_\nu(z), \quad k \in \mathbb{N}.$$

Отсюда вытекает, что все функции  $z^{n_1} g_1(z), \dots, z^{n_\nu} g_\nu(z)$  вне множества нулей функции  $\varphi$  удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} z^{n_1} g_1(z) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z) = 0, \\ \omega_q^{n_1} z^{n_1} g_1(z) + \dots + \omega_q^{n_\nu} z^{n_\nu} g_\nu(z) = 0, \\ \dots \dots \dots \\ \omega_q^{(v-1)n_1} z^{n_1} g_1(z) + \dots + \omega_q^{(v-1)n_\nu} z^{n_\nu} g_\nu(z) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Определитель этой системы совпадает с определителем Вандермонда и отличен от нуля. Следовательно, функции  $z^{n_1} g_1(z), \dots, z^{n_\nu} g_\nu(z)$  равны нулю вне нулей функции  $\varphi$ . Поэтому целые функции  $g_1(z), \dots, g_\nu(z)$  являются тождественными нулями. Значит,  $\mathbf{g}^{(1)} = \mathbf{g}^{(2)}$ . Таким образом, взаимная однозначность отображения  $\mathbf{u}_\varphi : \mathbf{O}_\varphi \rightarrow P(\Omega)$  доказана.

*Описание топологии пространства  $\mathbf{O}_\varphi$ .* Для доказательства основной теоремы потребуется независимое от пространства  $P(\Omega)$  описание топологии пространства  $\mathbf{O}_\varphi$ . Если область  $\Omega$  является выпуклой, ограниченной и содержит начало, то существует простое независимое описание этой топологии. Предположим, что область  $\Omega$  является выпуклой, ограниченной и содержит начало. Так как  $0 \in \Omega$ , то при некотором  $\rho > 0$  круг  $U_\rho := \{z : |z| < \rho\}$  лежит в области  $\Omega$ . Пусть  $h_\Omega(\theta) := \sup_{z \in \Omega} \operatorname{Re}(z \exp\{-i\theta\})$  – опорная функция области  $\Omega$  в смысле комплексного анализа. Для любого  $\theta \in \mathbf{R}$  выполняется очевидное неравенство  $h_\Omega(\theta) > \rho$ . Выберем натуральное  $m$  из условия  $m > \rho^{-1}$  и символом  $\mathbf{O}_{\varphi, m}$  обозначим векторное пространство всех целых  $\nu$ -функций  $\mathbf{g} := (g_1, \dots, g_\nu)$ , для которых

$$\sup_{z \in \mathbf{C}} \frac{|z^{n_1} g_1(z^q) \varphi(z) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z^q) \varphi(z)|}{\exp h_m(z)} < +\infty,$$

где  $\mathbf{n} := \{n_1, \dots, n_\nu\}$  – индикатор пространства  $\mathbf{O}_\varphi$ ;  $h_m$  – неотрицательная функция  $z \rightarrow \left( h_\Omega(\arg z) - \frac{1}{m} \right) |z|$ .

Соотношение

$$\|\mathbf{g}\|_m := \sup_{z \in \mathbf{C}} \frac{|z^{n_1} g_1(z^q) \varphi(z) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z^q) \varphi(z)|}{\exp h_m(z)}$$

определяет норму на пространстве  $\mathbf{O}_{\varphi, m}$ . Действительно, если  $\|\mathbf{g}\|_m = 0$ , то

$z^{n_1} g_1(z^q) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z^q) = 0$  для любого  $z \in \mathbf{C}$ . Значит, для любого  $z \in \mathbf{C}$  имеет место система (2), определитель которой отличен от нуля, следовательно,  $\mathbf{g} = 0$ . Остальные аксиомы нормы тоже выполнены.

Пространства  $\mathbf{O}_{\varphi, m}$  являются банаховыми. Действительно, выберем фундаментальную последовательность  $\mathbf{g}^{(j)} := (g_1^{(j)}, \dots, g_\nu^{(j)}) \in \mathbf{O}_{\varphi, m}$ . Она ограничена в пространстве  $\mathbf{O}_{\varphi, m}$ , т.е. для всех  $j \in \mathbf{N}$  и некоторого  $C > 0$  выполняется неравенство

$$\|\mathbf{g}^{(j)}\|_m := \sup_{z \in \mathbf{C}} \frac{|z^{n_1} g_1(z^q) \varphi(z) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z^q) \varphi(z)|}{\exp h_m(z)} \leq C.$$

Значит, последовательность функций  $\psi^{(j)}(z) := z^{n_1} g_1^{(j)}(z^q) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu^{(j)}(z^q)$  равномерно ограничена на компактах. Из легко проверяемых соотношений

$$\mathbf{g}_k^{(j)}(z^q) = \frac{\Delta_{n_A}^k(\psi^{(j)}(z), \psi^{(j)}(\omega_q z), \dots, \psi^{(j)}(\omega_q^{v-1} z))}{z^{n_k} \Delta_{n_A}},$$

$k \in \{1, \dots, \nu\}$ , вытекает, что последовательности  $g_k^{(j)}(z^q)$  равномерно ограничены на компактах. По теореме Монтеля из последовательности  $\mathbf{g}_k^{(j)}(z^q) := (g_1^{(j)}(z^q), \dots, g_\nu^{(j)}(z^q))$  можно так выбрать подпоследовательность

$\mathbf{g}_k^{(j_i)}(z^q) := (g_1^{(j_i)}(z^q), \dots, g_\nu^{(j_i)}(z^q))$ , что для любого  $k \in \{1, \dots, \nu\}$  последовательность  $g_k^{(j_i)}(z^q)$  будет сходиться равномерно на компактах к некоторой целой функции  $\psi_k(z)$ . В обыкновенных точках аналитического накрытия  $(\mathbf{C}, z^q, \mathbf{C})$  функция  $\psi_k(z)$  представляется в виде композиции

$g_k(z^q)$ , где  $g_k(\zeta)$  – аналитическая функция, совпадающая с поточечным пределом функций  $g_k^{(j_i)}(\zeta)$ . Значит,  $\nu$ -функция  $\mathbf{g} := (g_1, \dots, g_\nu)$  является целой  $\nu$ -функцией и принадлежит пространству  $\mathbf{O}_{\varphi, m}$ . При этом предельный переход при  $p \rightarrow \infty$  в неравенстве  $\|\mathbf{g}^{(j_i)} - \mathbf{g}^{(j_{i+p})}\|_m < \varepsilon$  показывает, что последовательность  $\mathbf{g}^{(j_i)}$  сходится к  $\mathbf{g}$  в пространстве  $\mathbf{O}_{\varphi, m}$ .

Докажем, что вложение  $\mathbf{O}_{\varphi, m} \subseteq \mathbf{O}_{\varphi, m+1}$  является вполне непрерывным. Для этого выберем последовательность  $\mathbf{g}^{(j)} := (g_1^{(j)}, \dots, g_\nu^{(j)}) \in U_{\varphi, m}$ , где  $U_{\varphi, m}$  –

единичный шар в  $\mathbf{O}_{\varphi, m}$ . Для всех  $j \in \mathbf{N}$  выполняется неравенство

$$\|g^{(j)}\|_m := \sup_{z \in \mathbf{C}} \frac{|z^{n_1} g_1^{(j)}(z^q) \varphi(z) + \dots + z^{n_\nu} g_\nu^{(j)}(z^q) \varphi(z)|}{\exp h_m(z)} \leq 1.$$

Из этого неравенства вытекает, что последовательности  $g_k^{(j)}(z^q)$  равномерно ограничены на компактах. По теореме Монделя из последовательности  $g^{(j)}(z^q)$  можно выбрать подпоследовательность  $g^{(j_i)}(z^q)$ , сходящуюся равномерно на компактах к некоторой целой  $\nu$ -функции, которая представляется в виде композиции  $g(z^q)$ , где  $g$  – целая  $\nu$ -функция. Так как  $g$  принадлежит шару  $U_{\varphi, m}$  и при этом  $\|g - g^{(j_i)}\|_{m+1} \leq \|g - g^{(j_i)}\|_m \rightarrow 0$ , то шар  $U_{\varphi, m}$  компактен в пространстве  $\mathbf{O}_{\varphi, m+1}$ .

Из известного описания топологии пространства  $P(\Omega)$  очевидным образом вытекает справедливость следующего предложения.

**Предложение 2.** Пространство  $\mathbf{O}_\varphi$  совпадает с индуктивным пределом пространств  $\mathbf{O}_{\varphi, m} := (\mathbf{O}_{\varphi, m}; \|g\|_m)$  относительно вполне непрерывных вложений  $\mathbf{O}_{\varphi, m} \subseteq \mathbf{O}_{\varphi, m+1}$ ,  $m > \rho^{-1}$ .

### Предварительные сведения

*Факторизация целых симметричных функций.*

Две целые функции  $\psi_1, \psi_2$  называются эквивалентными (в обозначениях  $\psi_1 \sim \psi_2$ ), если вне некоторого множества нулевой линейной плотности  $|\ln|\psi_1(z)| - \ln|\psi_2(z)|| = o(|z|)$ ,  $z \rightarrow \infty$ . (3)

Введенное отношение эквивалентности рефлексивно, симметрично, транзитивно; оно сохраняется при умножении на эквивалентные функции: если  $f_1 \sim f_2$  и  $g_1 \sim g_2$ , то  $f_1 g_1 \sim f_2 g_2$ .

*Доказательство* теоремы 1 существенно опирается на следующую факторизационную теорему.

**Теорема 2.** Любая целая  $q$ -симметричная функция  $\psi$  экспоненциального типа может быть представлена в виде произведения  $\psi = \psi_1 \psi_2$ , где  $\psi_1, \psi_2$  – целые  $q$ -симметричные функции и  $\psi_1 \sim \psi_2$ .

*Доказательство* в работе [9]. Теорему 2 можно использовать при расщеплении целой  $q$ -симметричной функции  $\psi$  экспоненциального типа на  $N := 2^k$  эквивалентных сомножителей [11].

*Оценка частичных сумм ряда Тейлора.* В ходе доказательства основной теоремы нам потребуется предложение, которое дает оценку частичных сумм ряда Тейлора  $q$ -симметричной функции.

**Лемма.** Если для целой функции  $\psi$  вне некоторого множества  $E$  нулевой линейной плотности выполняется соотношение

$$\ln|\psi(z)| \leq \sigma|z| + b, \quad z \rightarrow \infty, \quad (4)$$

где  $\sigma, b > 0$ , то при некотором  $A \geq 1$  частичные суммы  $\psi_k$  ряда Тейлора функции  $\psi$  удовлетворяют равномерной по  $z$  оценке  $|\psi_k(z)| \leq A \exp 2\sigma|z|$ .

*Доказательство.* Так как множество  $E$  имеет нулевую линейную плотность, то существуют окружности  $|z| = r_n$ , которые не пересекаются с множеством  $E$  и удовлетворяют условиям:  $0 < r_n < r_{n+1} < \sqrt{2}r_n$  и  $r_n \rightarrow +\infty$  при  $n \rightarrow \infty$ . Выберем произвольное  $z \in \mathbf{C}$ . При некотором  $n$   $r_n \leq |z| \leq r_{n+1}$ , значит, в силу (4)

$$\begin{aligned} \ln|\psi(z)| &\leq \ln M_\psi(r_{n+1}) \leq \sigma r_{n+1} + b \leq \\ &\leq \sqrt{2}\sigma r_n + b \leq \sqrt{2}\sigma|z| + b. \end{aligned}$$

Здесь и далее символ  $M_f(r)$  обозначает число  $\max_{|z| \leq r} |f(z)|$ . В силу неравенств Коши для частичных сумм  $\psi_k$  справедливы равномерные по  $z$  оценки

$$|\psi_k(z)| \leq \sum_{j=0}^k \frac{M_\psi(\sqrt{2}|z|)}{(\sqrt{2}|z|)^j} |z|^j \leq \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1} M_\psi(\sqrt{2}|z|).$$

Следовательно, для любых  $k$  и любых  $z$  выполняется неравенство

$$|\psi_k(z)| \leq \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1} e^b \exp(2\sigma|z|) = A \exp 2\sigma|z|,$$

где  $A \geq \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1}$ . Лемма доказана.

*Доказательство теоремы 1.* Пусть  $\Omega$  – выпуклая область и  $\varphi \in P(\Omega)$ . Если целая  $\nu$ -функция  $g$  принадлежит пространству  $\mathbf{O}_\varphi$ , то для некоторого  $R > 0$  имеет место включение  $g \in \mathbf{O}_\varphi(\Omega_R)$ , где  $\Omega_R$  – открытый круг  $\{z \in \Omega : |z| < R\}$ . При этом вложение  $P(\Omega_R) \subseteq P(\Omega)$  является непрерывным, значит, вложение  $\mathbf{O}_\varphi(\Omega_R) \subseteq \mathbf{O}_\varphi$  тоже является непрерывным. Отсюда следует, что без потери общности можно считать, что область  $\Omega$  является ограниченной.

Выберем произвольную точку  $a \in \Omega$ . Область  $\Omega - a$  содержит начало и является выпуклой и

ограниченной. Пусть  $h_{\Omega-a}(\theta) := \sup_{z \in \Omega-a} \operatorname{Re}(ze^{-i\theta})$  – опорная функция выпуклой области  $\Omega-a$  в смысле комплексного анализа;  $h_m(z) := \left( h_{\Omega-a}(\arg z) - \frac{1}{m} \right) |z|$ ;  $\mathbf{O}_{\varphi, m}$  – векторное пространство целых  $\nu$ -функций  $\mathbf{g} := (g_1, \dots, g_\nu)$ , для которых конечна норма  $\|\mathbf{g}\|_m := \sup_{z \in \mathbb{C}} \frac{|z^{n_1} g_1(z^q) \varphi(z) e^{-az} + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z^q) \varphi(z) e^{-az}|}{\exp h_m(z)}$ ,

где  $\mathbf{n} := \{n_1, \dots, n_\nu\}$  – индикатор замкнутой полиномиальной оболочки  $I_\varphi$  в пространстве  $P(\Omega)$ .

Отображение  $P(\Omega) \rightarrow P(\Omega-a) | \psi(z) \rightarrow \psi(z) e^{-az}$  является топологическим изоморфизмом, значит, по предложению 2 пространство  $\mathbf{O}_\varphi$  совпадает с индуктивным пределом прямого спектра банаховых пространств  $\mathbf{O}_{\varphi, m} := (\mathbf{O}_{\varphi, m}; \|\mathbf{g}\|_m)$ ,  $m \in \mathbf{N}$ , относительно вполне непрерывных вложений  $\mathbf{O}_{\varphi, m} \subseteq \mathbf{O}_{\varphi, m+1}$ ,  $m \in \mathbf{N}$ . Предположим, что индикатор  $\mathbf{n} := \{n_1, \dots, n_\nu\}$  замкнутой полиномиальной оболочки  $I_\varphi \subseteq P(\Omega)$  удовлетворяет условию периодичности  $n_2 - n_1 = n_3 - n_2 = \dots = n_{\nu+1} - n_\nu$ , где  $n_{\nu+1} = n_1 + q$ . Из этого условия вытекает, что для любого  $k \in \{1, \dots, \nu+1\}$  и некоторого натурального  $t$  выполняются равенства

$$n_k - n_1 = (n_k - n_{k-1}) + (n_{k-1} - n_{k-2}) + \dots + (n_2 - n_1) = t(k-1).$$

Значит,  $q = n_{\nu+1} - n_1 = t\nu$  и

$$n_k = n_1 + t(k-1) = n_1 + \frac{q}{\nu}(k-1) \text{ для любого } k \leq \nu.$$

Выберем произвольную целую  $\nu$ -функцию  $\mathbf{g} := (g_1, \dots, g_\nu)$ , лежащую в пространстве  $\mathbf{O}_\varphi$ . Нам достаточно показать, что существует последовательность  $\nu$ -многочленов  $\mathbf{g}_s$ , которая сходится к  $\nu$ -функции  $\mathbf{g}$  в топологии пространства  $\mathbf{O}_\varphi$ . Приведем конструктивное доказательство этого факта, т.е. построим конкретную последовательность  $\nu$ -многочленов  $\mathbf{g}_s$ , которая будет сходиться к  $\nu$ -функции  $\mathbf{g}$  в топологии пространства  $\mathbf{O}_\varphi$ . Прежде всего, пространство  $\mathbf{O}_\varphi$  содержит все  $\nu$ -полиномы, значит,  $\mathbf{1} := (1, 0, \dots, 0) \in \mathbf{O}_\varphi$ . Из определения индуктивного

предела вытекает, что для некоторого  $m_0 \geq 4$  имеет место включение  $\mathbf{1} \in \mathbf{O}_{\varphi, m_0-3}$ . Следовательно, выполняется неравенство

$$\|\mathbf{1}\|_{m_0-3} := \sup_{z \in \mathbb{C}} \frac{|z^{n_1} \varphi(z) e^{-az}|}{\exp h_{m_0-3}(z)} = \sup_{z \in \mathbb{C}} \frac{|z^{n_1} \varphi(z)|}{\exp(h_{m_0-3}(z) + \operatorname{Re} az)} < +\infty.$$

Отсюда вытекает, что функция  $z^{n_1} \varphi(z)$  является целой функцией экспоненциального типа. Значит, функция  $\varphi(z)$  тоже является целой функцией экспоненциального типа. Аналогично из включения  $\mathbf{g} \in \mathbf{O}_\varphi$  вытекает, что при некотором натуральном  $m \geq m_0$  имеет место включение  $\mathbf{g} \in \mathbf{O}_{\varphi, m-3}$ , т.е.

$$\|\mathbf{g}\|_{m-3} := \sup_{z \in \mathbb{C}} \frac{|z^{n_1} g_1(z^q) \varphi(z) e^{-az} + \dots + z^{n_\nu} g_\nu(z^q) \varphi(z) e^{-az}|}{\exp h_m(z)} = \sup_{z \in \mathbb{C}} |z^{n_1}| \times \frac{|g_1(z^q) \varphi(z) + z^t g_1(z^q) \varphi(z) + \dots + z^{t(\nu-1)} g_\nu(z^q) \varphi(z)|}{\exp(h_m(z) + \operatorname{Re} az)} < +\infty.$$

Из этой оценки вытекает, что функция

$$f(z) := g_1(z^q) \varphi(z) + z^t g_2(z^q) \varphi(z) + \dots + z^{t(\nu-1)} g_\nu(z^q) \varphi(z)$$

является целой функцией экспоненциального типа. Функция  $f(z)$  делится на функцию  $\varphi(z)$ , следовательно, частное

$$\psi(z^t) := \frac{f(z)}{\varphi(z)} = g_1(z^q) + z^t g_2(z^q) + \dots + z^{t(\nu-1)} g_\nu(z^q) = g_1(z^{t\nu}) + z^t g_2(z^{t\nu}) + \dots + z^{t(\nu-1)} g_\nu(z^{t\nu}) \quad (5)$$

является целой  $t$ -симметричной функцией экспоненциального типа [12]. Значит, при некоторых  $\sigma, b > 0$  справедливо соотношение

$$\ln |\psi(z^t)| \leq \sigma |z| + b. \quad (6)$$

Подберем  $n \in \mathbf{N}$  и  $\varepsilon > 0$  такими, что  $N := 2^n > 2\sigma n(m-1)$ ,  $\frac{\varepsilon}{2} \leq \frac{1}{m(m-1)} - \frac{2\sigma}{N}$ .

Воспользуемся факторизационной теоремой 2. Расщепляем функцию  $\psi(z^t)$  на  $N := 2^n$  множителей  $\psi(z^t) = \psi_1(z^t) \times \dots \times \psi_N(z^t)$ , где  $\psi_i(z^t)$  – целые симметричные функции и  $\psi_i(z^t) \sim \psi_j(z^t)$  для

любых  $i, j \in \{1, \dots, N\}$ . Затем расщепляем функцию  $\varphi(z)$  на  $N$  множителей  $\varphi(z) = \varphi_1(z) \times \dots \times \varphi_N(z)$ , где  $\varphi_i(z)$  – целые функции и  $\varphi_i(z) \sim \varphi_j(z)$  для любых  $i, j \in \{1, \dots, N\}$ . Расщепления функций  $\psi(z^t)$  и  $\varphi(z)$  индуцируют расщепление функции  $f(z)$  тоже на  $N$  множителей  $f(z) = f_1(z) \times \dots \times f_N(z)$ , в котором  $f_i(z)$  – целые функции и  $f_i(z) \sim f_j(z)$  для любых  $i, j \in \{1, \dots, N\}$ . Существует такое  $m_0 > 0$ , что при  $m \geq m_0$  для всех сомножителей двух последних произведений при некотором  $A \geq 1$  справедливы оценки

$$|\varphi_i(z)|, |f_i(z)| \leq A \exp \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N}, \quad z \in \mathbb{C}. \quad (7)$$

С другой стороны, из оценки (6) вытекает, что для всех  $z \in \mathbb{C}$  выполняются неравенства  $\ln |\psi_i(z^t)| \leq \frac{\sigma}{N} |z| + b_i, \quad z \rightarrow \infty, \quad i \in \{1, \dots, N\}$ .

По лемме 1 при некотором  $B \geq 1$  частичные суммы  $\psi_{i,k}$  ряда Тейлора функции  $\psi_i$  являются  $t$ -симметричными и удовлетворяют равномерной по  $z$  оценке

$$|\psi_{i,k}(z^t)| \leq B \exp \frac{2\sigma}{N} |z|, \quad i \in \{1, \dots, N\}. \quad (8)$$

Выберем произвольную возрастающую последовательность  $r_s \rightarrow +\infty$ . Зафиксируем  $s \in \mathbb{N}$ . Пусть  $R_0 := r_s$ . Во-первых, при условии  $k \rightarrow \infty$  произведение  $\psi_{1,k}(z^t) \varphi_1(z)$  стремится к функции  $f_1(z)$  равномерно на компактах, значит, в силу (7) существует такое  $k_1 \in \mathbb{N}$ , что при  $|z| \leq R_0$  и  $k \geq k_1$  выполняется неравенство

$$|\psi_{1,k}(z^t) \varphi_1(z)| \leq 2|f_1(z)| \leq 2A \exp \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N}.$$

Индикатор функции  $\psi_{1,k_1}(z^t) \varphi_1(z)$  совпадает с индикатором функции  $\varphi_1(z)$ . Значит, существует такое  $R_1 > R_0$ , что при  $|z| \geq R_1$  выполняется неравенство

$$|\psi_{1,k_1}(z^t) \varphi_1(z)| \leq \exp \left( \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N} + \frac{\varepsilon}{2N} |z| \right).$$

Из (7), (8) вытекает, что при  $R_0 \leq |z| \leq R_1$  выполняется неравенство

$$|\psi_{1,k_1}(z^t) \varphi_1(z)| \leq AB \exp \left( \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N} + \frac{2\sigma}{N} |z| \right).$$

Во-вторых, когда  $k \rightarrow \infty$ , произведение  $\psi_{2,k}(z^t) \varphi_2(z)$  стремится к функции  $f_2(z)$  равно-

мерно на компактах, значит, в силу (7) существует такое  $k_2 \in \mathbb{N}$ , что при  $|z| \leq R_1$  выполняется неравенство

$$|\psi_{2,k_2}(z^t) \varphi_2(z)| \leq 2|f_2(z)| \leq 2A \exp \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N}.$$

Индикатор функции  $\psi_{2,k_2}(z^t) \varphi_2(z)$  совпадает с индикатором функции  $\varphi_2(z)$ . Значит, существует такое  $R_2 > R_1$ , что при  $|z| \geq R_2$  выполняется неравенство

$$|\psi_{2,k_2}(z^t) \varphi_2(z)| \leq \exp \left( \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N} + \frac{\varepsilon}{2N} |z| \right).$$

Из (7), (8) следует, что при  $R_1 \leq |z| \leq R_2$  выполняется неравенство

$$|\psi_{2,k_2}(z^t) \varphi_2(z)| \leq AB \exp \left( \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N} + \frac{2\sigma}{N} |z| \right).$$

В-третьих, повторяя процедуру  $N$  раз, получим систему положительных чисел  $r_s := R_0 < R_1 < \dots < R_N$

и систему произведений  $\psi_{i,k_i}(z^t) \varphi_i(z)$ ,  $i \in \{1, \dots, N\}$ , удовлетворяющих следующим неравенствам:

$$|\psi_{i,k_i}(z^t) \varphi_i(z)| \leq 2A \exp \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N} \quad \text{при } |z| \leq R_{i-1},$$

$$|\psi_{i,k_i}(z^t) \varphi_i(z)| \leq AB \exp \left( \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N} + \frac{2\sigma}{N} |z| \right)$$

при  $R_{i-1} \leq |z| \leq R_i$ ,

$$|\psi_{i,k_i}(z^t) \varphi_i(z)| \leq \exp \left( \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N} + \frac{\varepsilon}{2N} |z| \right)$$

при  $|z| \geq R_i$ .

Произведение

$$p_s(z^t) \varphi(z) e^{-az} := e^{-az} \prod_{i=1}^N \psi_{i,k_i}(z^t) \varphi_i(z),$$

где  $p_s(z^t) := \psi_{1,k_1}(z^t) \times \dots \times \psi_{N,k_N}(z^t)$  –  $t$ -симметричный полином, допускает следующие оценки.

При  $|z| \leq R_0$  справедливо неравенство

$$|p_s(z^t) \varphi(z) e^{-az}| \leq 2^N A^N \exp h_m(z), \quad (9)$$

при  $|z| \geq R_N$  справедливо неравенство

$$\begin{aligned} |p_s(z^t) \varphi(z) e^{-az}| &\leq |e^{-az}| \left( \exp \frac{h_m(z) + \operatorname{Re} az}{N} + \frac{\varepsilon}{2N} |z| \right)^N = \\ &= |e^{-az}| \exp \left( h_m(z) + \operatorname{Re} az + \frac{\varepsilon}{2} |z| \right) = \\ &= \exp \left( h_m(z) + \frac{\varepsilon}{2} |z| \right), \end{aligned} \quad (10)$$

а при  $R_{i-1} \leq |z| \leq R_i$  справедливо неравенство

$$\begin{aligned} |p_s(z^t)\varphi(z)e^{-az}| &\leq 2^{N-i} A^{N-i+1} B \exp\left[\frac{h_m(z)}{N}(N-i)+\right. \\ &+ \left.\left(\frac{h_m(z)}{N} + \frac{2\sigma|z|}{N}\right) + \left(\frac{h_m(z)}{N} + \frac{\varepsilon|z|}{2N}\right)(i-1)\right] = \\ &= 2^{N-i} A^{N-i+1} B \exp\left[h_m(z) + \left(\frac{2\sigma}{N} + \frac{\varepsilon(i-1)}{2N}\right)|z|\right]. \end{aligned}$$

$$\text{Учитывая, что } \frac{2\sigma}{N} + \frac{\varepsilon(i-1)}{2N} \leq \frac{2\sigma}{N} + \frac{\varepsilon}{2} \leq \frac{1}{m(m-1)}$$

для всех  $z$  из кольца  $R_{i-1} \leq |z| \leq R_i$  получаем

$$|p_s(z^t)\varphi(z)e^{-az}| \leq 2^N A^N B \exp h_{m-1}(z). \quad (11)$$

Из (9), (10) и (11) вытекает, что для всех  $z \in \mathbb{C}$  выполняется неравенство

$$|p_s(z^t)\varphi(z)e^{-az}| \leq C \exp h_{m-1}(z), \quad (12)$$

где  $C := \max\{2^N A^N, 2^N A^N B\}$

Осталось заметить, что последовательность  $t$ -симметричных многочленов  $p_s(z^t)$  сходится к функции  $\psi(z^t)$  равномерно на компактах. Из оценки (12) следует, что последовательность  $z^{n_1} p_s(z^t)\varphi(z)e^{-az}$  сходится к функции  $z^{n_1} f(z)e^{-az}$  в пространстве  $P(\Omega_{m-1} - a)$ . При этом полином  $p_s(z)$  допускает представление в виде

$$p_s(z) = \sum_{k=0}^{v-1} z^k p_{s,k}(z^v), \text{ где}$$

$$p_{s,k}(z^v) := \frac{1}{t^k} \sum_{j=0}^{v-1} \omega_v^{-kj} p_s(\omega_v^j z) \in \mathbb{C}[z^v],$$

значит,

$$z^{n_1} p_s(z^t) = \sum_{k=0}^{v-1} z^{tk+n_1} p_{s,k}(z^q) = \sum_{k=1}^v z^{n_k} p_{s,k}(z^q).$$

Следовательно,  $v$ -полином

$\mathbf{g}_s(z) := (p_{s,1}(z), \dots, p_{s,v}(z))$  сходится к  $v$ -функции  $\mathbf{g}$  в пространстве  $O_{\varphi, m}$ , а это, в свою очередь, означает, что последовательность  $\mathbf{g}_s(z)$  сходится к  $\mathbf{g}$  в пространстве  $\mathbf{O}_{\varphi}$ . Теорема доказана.

#### Литература

1. Красичков-Терновский И.Ф. Инвариантные подпространства аналитических функций. I. Спектральный синтез на выпуклых областях // *Мат. сб.* 1972. Т. 87 (129), № 4. С. 459–489.

2. Шишкин А.Б. Проективное и инъективное описания в комплексной области. Двойственность // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Математика. Механика. Информатика.* 2014. Т. 14, № 1. С. 47–65.

3. Шишкин А.Б. Спектральный синтез для оператора, порожденного умножением на степень независимой переменной // *Мат. сб.* 1991. Т. 182, № 6. С. 828–848.

4. Каченко В.А. Спектральная теория в пространствах аналитических функционалов для операторов, порожденных умножением на независимую переменную // *Мат. сб.* 1980. Т. 112 (154), № 3 (7). С. 421–466.

5. Красичков-Терновский И.Ф. Инвариантные подпространства аналитических функций. II. Спектральный синтез на выпуклых областях // *Мат. сб.* 1972. Т. 88, № 1. С. 3–30.

6. Шишкин А.Б. Локальное описание замкнутых подмодулей в специальном модуле целых функций экспоненциального типа // *Мат. заметки.* 1989. Т. 46, № 6. С. 94–100.

7. Волковая Т.А., Шишкин А.Б. Локальное описание целых функций. Подмодули ранга 1 // *Владикавказский мат. журн.* 2014. Т. 16, № 2. С. 14–28.

8. Волковая Т.А., Шишкин А.Б. Локальное описание целых функций // *Мат. форум. Исследования по мат. анализу.* 2014. Т. 6, № 1. С. 215–226.

9. Красичков-Терновский И.Ф. Спектральный синтез в комплексной области для дифференциального оператора с постоянными коэффициентами. III. Обильные подмодули // *Мат. сб.* 1992. Т. 183, № 6. С. 55–86.

10. Tatarkin A.A., Saranchuk U.S. Elementary solutions of a homogeneous  $q$ -sided convolution equation // *Probl. Anal. Issues. Anal.* 2018. Vol. 7 (25). Special Issue. P. 137–152.

11. Шишкин А.Б. Экспоненциальный синтез в ядре оператора симметричной свертки // *Записки научных семинаров ПОМИ.* 2016. Т. 447. С. 129–170.

12. Красичков-Терновский И.Ф. Аппроксимационная теорема для однородного уравнения векторной свертки // *Мат. сб.* 2004. Т. 195, № 9. С. 37–56.

#### References

1. Krasichkov-Ternovskii I.F. (1972). Invariant subspaces of analytic functions. I. Spectral analysis on convex regions. *Mat. sb.*, vol. 87 (129), No. 4, pp. 459-489. (in Russian).

2. Shishkin A.B. (2014). Projective and injective descriptions in the complex domain. Duality. *Izv. Saratov. univ. Mat. Mekh. Inform.*, vol. 14, No. 1, pp. 47-65. (in Russian).

3. Shishkin A.B. (1992). Spectral synthesis for an operator generated by multiplication by a power of the independent variable. *Mat. sb.*, vol. 73, No. 1, pp. 211-229.

4. Tkachenko V.A. (1980). Spectral theory in spaces of analytic functionals for operators generated by multiplication by the independent variable. *Mat. sb.*, vol. 112 (154), No. 3(7), pp. 421-466. (in Russian).
5. Krasichkov-Ternovskii I.F. (1972). Invariant subspaces of analytic functions. II. Spectral synthesis of convex domains. *Mat. sb.*, vol. 88 (130), No. 1 (5), pp. 3-30. (in Russian).
6. Shishkin A.B. (1989). Local description of closed submodules in a special module of entire functions of exponential type. *Math. Notes*, vol. 46, No. 6, pp. 952-956.
7. Volkovaya T.A., Shishkin A.B. (2014). Local description of entire functions. Submodules of rank 1. *Vladikavkaz. mat. zh.*, vol. 16, No. 2, pp. 14-28. (in Russian).
8. Volkovaya T.A., Shishkin A.B. (2014). Local description of entire functions. *Mat. forum. Issledovaniya po mat. analizu*, vol. 6, No. 1, pp. 215-226. (in Russian).
9. Krasichkov-Ternovskii I.F. (1992). Spectral synthesis in a complex domain for a differential operator with constant coefficients. III: Ample submodules. *Mat. sb.*, vol. 183, No. 6, pp. 55-86. (in Russian).
10. Tatarkin A.A. (2018). Elementary solutions of a homogeneous  $q$ -sided convolution equation. *Probl. Anal. Issues Anal.*, vol. 7(25), special issue, pp. 137-152.
11. Shishkin A.B. (2016). Exponential synthesis in the kernel of a symmetric convolution. *Zapiski nauchnykh seminarov POMI*, vol. 447, pp. 129-170. (in Russian).
12. Krasichkov-Ternovskii I.F. (2004). Approximation theorem for a homogeneous vector convolution equation. *Mat. sb.*, vol. 195, No. 9, pp. 37-56. (in Russian).

---

*Поступила в редакцию / Received*

*1 февраля 2021 г. / February 1, 2021*

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

## SCIENCES OF EARTH

УДК 556.324 (571.150)

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-42-48

ВЛИЯНИЕ БОРА НА КАЧЕСТВО ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
В АЛТАЙСКОМ КРАЕ© 2021 г. Г.Я. Барышников<sup>1</sup>, С.С. Слажнева<sup>1</sup>, Н.Б. Максимова<sup>1</sup>, П.В. Сотников<sup>2</sup><sup>1</sup>Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,<sup>2</sup>ООО «Барнаулстройизыскания», Барнаул, РоссияEFFECT OF BORON ON THE GROUNDWATER QUALITY  
IN ALTAI REGIONG.Ya. Baryshnikov<sup>1</sup>, S.S. Slazhneva<sup>1</sup>, N.B. Maximova<sup>1</sup>, P.V. Sotnikov<sup>2</sup><sup>1</sup>Altai State University, Barnaul, Russia,<sup>2</sup>LLC "Barnaulstrojizyskaniya", Barnaul, Russia

Барышников Геннадий Яковлевич – доктор географических наук, профессор, кафедра природопользования и геоэкологии, Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, г. Барнаул, 656049, Россия, e-mail: bgj@geo.asu.ru

Gennady Ya. Baryshnikov - Doctor of Geography, Professor, Department of Nature Management and Geoecology, Altai State University, Lenina Ave., 61, Barnaul, 656049, Russia, e-mail: bgj@geo.asu.ru

Слажнева Светлана Сергеевна – кандидат географических наук, доцент, кафедра природопользования и геоэкологии, Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, г. Барнаул, 656049, swetik315@mail.ru

Svetlana S. Slazhneva - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Nature Management and Geoecology, Altai State University, Lenina Ave., 61, Barnaul, 656049, Russia, e-mail: swetik315@mail.ru

Максимова Нина Борисовна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра природопользования и геоэкологии, Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, г. Барнаул, 656049, e-mail: ninmaxim@mail.ru

Nina B. Maximova - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Nature Management and Geoecology, Altai State University, Lenina Ave., 61, Barnaul, 656049, Russia, e-mail: ninmaxim@mail.ru

Сотников Пётр Викторович – инженер-геолог, ООО «Барнаулстройизыскания», ул. Чернышевского, 281б, Барнаул, 656008, Россия, e-mail: sotnikov.pet@yandex.ru

Petr V. Sotnikov - Geological Engineer, LLC «Barnaulstrojizyskaniya», Chernyshevskogo St., 281b, Barnaul, 656008, Russia, e-mail: sotnikov.pet@yandex.ru

Бор (В) широко распространен в поверхностных и подземных водах. В статье рассмотрена проблема качества питьевых подземных вод, которые в большинстве районов Алтайского края являются единственным источником водоснабжения. Поэтому качество подземных вод имеет большое значение для населения края. Питьевая вода должна быть пригодна для употребления в пищу и для всех бытовых целей. Основное внимание акцентировано на выявлении площади распространения этих вод с содержанием В, превышающим предельно допустимую концентрацию (ПДК). Проанализирована зависимость между В и величиной сухого остатка (МСО). Определены критические факторы, ответственные за высокую концентрацию В. Представлено общее комплексное исследование присутствия, распространения, а также определены ис-

точники поступления В в подземные воды Алтайского края. Выявлена зависимость между содержанием В и высокой заболеваемостью людей, проживающих в районах с его избытком. Установлено, что высокие концентрации В (более 0,5 мг/л) соответствуют зоне распространения соленоватых вод, которая занимает практически всю территорию степного Алтай – Кулундинско-Барнаульский артезианский бассейн. Их распределение географически совпадает с распределением В.

**Ключевые слова:** подземные воды, качество подземных вод для питья, содержание бора, повышенная соленость, химический анализ, сухой остаток, концентрация бора, токсичность.

*Boron (B) is widely spread in surface and ground waters. The article deals with the problem of drinking groundwater quality. Groundwater is the only source of water supply, in the most districts of the Altai Region. This suggests that the quality of groundwater is of great importance for the population of the region. Drinking water should be suitable for human consumption and for all household purposes. The main attention is focused on identifying the area of distribution B containing waters with the content exceeding the maximum permissible concentration (MPC). The relationship between B and dry residue (Mco) is analyzed. Crucial factors responsible for high B concentration have been identified. The general complex research of presence, distribution and sources of B inflow into ground waters of the Altai Region are defined in the article. The relationship between the B content and the high incidence of people living in areas with a high B content has been revealed. It was found that high concentrations of B (more than 0.5 mg/l) correspond to the zone of brackish water distribution, which occupies almost the entire territory of the steppe Altai - Kulundinsko-Barnaul artesian basin. Their distribution coincides geographically with the distribution of B.*

**Keywords:** ground waters, drinking groundwater quality, boron content, increased salinity, chemical analysis, dry residue, boron concentration, toxicity.

## Введение

На территории Алтайского края широкомасштабных аналитических исследований по определению содержания бора (В) в подземных водах не проводилось, но в единичных пробах отмечаются высокие концентрации В. Первые данные о его нахождении в подземных водах Кулундинской котловины относятся к 1957 г. [1]. Позднее было установлено, что В широко распространен в почвах и подземных водах Барабинской низменности и Тоболо-Ишим-Иртышской равнины [2], что указывает на наличие и его широкое распространение на юге Западной Сибири.

В континентальных засоленных районах с присутствием В в грунтовых водах борное засоление быстро развивается за счет испарения и непрерывного капиллярного подъема воды [3]. Высокое содержание В отмечалось в подземных водах Среднего Днепра. Примечательно, что высокий уровень В встречается в Ираке и Казахстане. Равнины Нижнего Дона и Западного Мангыча демонстрируют обилие В в солончаках и солончаковых почвах [4]. Более высокое количество доступного В обычно содержится в подземных водах различных регионов России – Южный Урал, Центральный федеральный округ, Волго-Вятский район, Западная Сибирь и др. [5].

В Алтайском крае подземные воды являются важным источником коммунального водоснабжения и общим источником для домов в селе и небольших городах. Это говорит о том, что удовлетворительное качество подземных вод имеет большое значение для населения края. Питьевая вода должна быть пригодна для употребления в пищу людьми и для всех обычных бытовых целей. К сожалению, только

относительно небольшая часть подземных вод в Алтайском крае соответствует санитарно-эпидемиологическим нормам и правилам. Из-за нехватки водных ресурсов часто потребляется высокоминерализованная вода с избытком железа, марганца, В и других химических элементов.

Как правило, В не встречается в земной коре в чистом виде. Обычно он находится в комбинированных состояниях, в подземных водах – в виде оксида В и ортоборной кислоты. В связи с этим исследования по В, его механизму влияния на здоровье человека расширяются, хотя до сих пор безопасные пределы суточного воздействия не определены. Основное токсическое действие В связано с раздражением желудочно-кишечного тракта. Потребление В в больших количествах вызывает расстройство пищеварения и приводит к патологии желудочно-кишечного тракта, возникновению «борного гастроэнтерита», вызывающего повреждение печени, почек и центральной нервной системы.

У животных основной токсический эффект, связанный с В, затрагивает репродуктивную систему, вызывая специфические побочные эффекты в мужских репродуктивных трактах – подавление семенных канальцев, дегенерация и атрофия семенных канальцев с отсутствием или потерей половых клеток. Известно токсическое воздействие на развитие плода, которое вызывает высокую внутриутробную смертность и врожденные дефекты [6].

В природе В встречается в основном в виде боросиликатов и турмалинов в осадочных породах. Содержание В в осадочных породах подразумевает наличие борациита, бората натрия, калийного борита, боронатрокальцита, колеманита, ашарита и т.д. Как правило, эти минералы образованы кальцийсо-

держащим силикатом магниезиального железа, алюмосиликатами, соленосными отложениями и глиной с высокой концентрацией В, абсорбированного из морской воды.

Источником боратных соединений в природе служат воды из нефтяных месторождений, рапы соленых озер, термальных источников, связанных с вулканической деятельностью [7]. Преобладающими формами В в природных водных системах являются одноядерные соединения, такие как борная кислота и борат-ион. В слабоминерализованных грунтовых водах содержание В обычно составляет десятые или сотые доли мг/л. Однако в минерализованных щелочных водах его концентрация может достигать от 1 до 10 мг/л, что соответствует второму классу опасности и делает такую воду потенциально мало пригодной для питья [7], в то время как гигиеническими требованиями к качеству питьевой воды установлено допустимое значение В менее 0,5 мг/л [8]. Большое количество В было обнаружено в почве и подземных водах Удмуртской Республики [9], а для Алтайского края проблема бора должным образом до сих пор не решалась.

Для частичного решения этой проблемы Научно-исследовательским институтом геолого-геоэкологических проблем, находящимся в г. Чебоксары (Чувашская Республика), были проведены совместные и долгосрочные исследования по определению В в окружающей среде. Этим институтом на основе исследований, проведенных в Кирове и Кирово-Чепецке, была разработана инструкция по использованию борсодержащих подземных вод [10].

## Методы исследования

Для определения качества подземных вод эксплуатируемых водоносных горизонтов в Алтайском крае нами был проведен водно-химический анализ, позволивший выявить количественные показатели химических компонентов, влияющих на качество и их соответствие требованиям [8]. При этом использовались следующие методы химического анализа: флуориметрический, с использованием флуоресцентного анализатора «Флуорат 02-3М» для определения В в пробах воды, погрешность которого составила 0,15 мг/л; гравиметрический тест для определения сухого остатка в грунтовых водах с погрешностью в среднем 0,15 г/л. Все пробы воды были проанализированы в аккредитованных лабораториях Томского научно-исследовательского института курортологии и физиотерапии и Центра гигиены и эпидемиологии Алтайского края.

Для локализации участков с широким распространением В в подземных водах использованы работы ОАО «Алтайская гидрогеологическая экспедиция» за 2001–2012 гг., а также данные службы мониторинга.

## Результаты и их обсуждение

Ниже приводятся результаты полного химического анализа проб воды из 72 скважин эксплуатируемых водоносных горизонтов в пределах Алтайского края. Собранные данные обработаны и сведены в таблицу.

Концентрация В и сухого остатка в подземных водах / Concentration of В and dry residue in groundwater

Административный район	Местоположение	Геологический индекс	Дата отбора пробы	В, мг/дм <sup>3</sup>	Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>
Усть-Пристанский	Елбанка	N <sub>1</sub>	24.05.2003	0,03	0,59
Бурлинский	Первомайское	P <sub>3</sub> <sup>2</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	30.06.2003	0,03	0,7
Немецкий	Кусак, 2 км на юг	N <sub>1</sub>	23.06.2003	0,03	0,94
Немецкий	Подснежное	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	23.06.2003	0,03	0,96
Целинный	Овсянниково	PZ	22.05.2003	0,03	1,08
Локтевский	Самарка	PZ	01.07.2003	0,03	–
Панкрушихинский	Кривое	P <sub>2</sub> <sup>3</sup>	27.06.2003	0,03	1,25
Петропавловский	Соловьяха	PZ	23.05.2003	0,03	–
Усть-Калманский	Новый Чарыш	PZ	27.05.2003	0,03	–
Угловский	Куйбышево	aQ <sub>II-III</sub>	21.10.2005	0,05	0,1
Курынский	Кольвань	PZ	30.04.2009	0,05	0,21
Локтевский	ЗАО «Горняцкий водоканал»	aQ <sub>I-IV</sub>	19.05.2011	0,05	0,24
Чарышский	Красные Орлы	PZ	10.06.2011	0,05	0,28
Чарышский	Первомайское	PZ	10.06.2011	0,05	0,34
Новоалтайск	ООО «Кольцо»	N12-3	27.10.2010	0,05	0,38
Заринский	Старокопылово	PZ	13.05.2012	0,05	0,39
Тальменский	Анисимово	PZ	10.08.2011	0,05	0,48

Продолжение таблицы

Административный район	Местоположение	Геологический индекс	Дата отбора пробы	В, мг/дм <sup>3</sup>	Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>
Михайловский	Михайловка	P <sub>3</sub> <sup>2</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	10.08.2009	0,05	0,59
Рубцовский	VI Конгресс	PZ	02.09.2011	0,05	–
Табунский	Табуны	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	27.05.2009	0,06	0,37
Троицкий	Вершинино	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	15.06.2005	0,09	0,35
Заринский	Новозыряново	PZ	16.05.2012	0,09	0,36
Рубцовский	Вишневка	PZ	13.07.2011	0,09	–
Бурлинский	Новопесчаное	P <sub>2</sub> <sup>3</sup>	01.08.2011	0,13	1,03
Рубцовский	Рубцовск	aQ <sub>II-III</sub>	08.09.2011	0,14	0,59
Солонешинский	Солонешное	PZ	08.09.2007	0,17	0,26
Заринский	Новозыряново	pgQ <sub>I-II</sub>	05.10.2011	0,17	0,46
Тальменский	Среднесибирский	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	08.03.2011	0,18	0,3
	Кошелево	QE	31.03.2011	0,19	0,39
Ключевский	Ключи	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	28.04.2008	0,23	0,32
Усть-Калманский	Новобураново	PZ	28.05.2003	0,23	1,19
Немецкий	Гальштадт	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	30.04.2009	0,25	0,97
Панкрушихинский	Береговое	N <sub>1</sub> <sup>2-3</sup>	27.06.2003	0,28	–
Егорьевский	Первомайское	pgQ <sub>I-II</sub>	20.06.2012	0,37	0,47
Крутихинский	Долганка	N <sub>1</sub> <sup>2-3</sup>	25.06.2003	0,42	1,69
Поспелихинский	Клепечиха	P <sub>3</sub> <sup>2</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	30.07.2001	0,53	3,12
Новичихинский	Солоновка	P <sub>3</sub> <sup>2</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	31.07.2001	0,53	3,23
Ребрихинский	Зеленая Роща	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	31.03.2009	0,56	0,86
Каменский	Толстовский	P <sub>2</sub> <sup>3</sup>	24.06.2003	0,57	1,13
Панкрушихинский	Борисовский	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	28.06.2003	0,57	1,7
Романовский	Грановка	pgQ <sub>I-II</sub>	30.09.2005	0,66	0,51
Поспелихинский	Им. Мамонтова	P <sub>3</sub> <sup>2</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	31.07.2001	0,66	1,73
Волчихинский	Березовский	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	25.06.2003	0,71	1,33
Каменский	Новоярки	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	24.06.2003	0,71	1,42
	Поперечное	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	24.06.2003	0,71	2,18
Егорьевский	Новоегорьевское	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	12.09.2002	0,81	1,73
Ключевский	Зеленая Поляна	N <sub>1</sub> <sup>2-3</sup>	25.06.2003	0,85	1,1
Топчихинский	Володарка	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	24.07.2001	0,93	1,17
Шипуновский	Порожнее	N <sub>1</sub> <sup>2-3</sup>	27.07.2001	0,93	2,43
Волчихинский	Мальшев Лог	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	26.06.2003	0,99	1,98
Панкрушихинский	Подойниково	P <sub>3</sub> <sup>2</sup>	26.06.2003	0,99	2,78
Кулундинский	Кулунда	N <sub>1</sub> <sup>2-3</sup>	09.07.2002	1,03	1,37
Благовещенский	Николаевка	K <sub>2k-m</sub>	05.07.2002	1,03	2,13
Калманский	Калманка	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	23.07.2001	1,06	1,01
Романовский	Закладное	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	07.06.2002	1,11	2,09
Волчихинский	Солоновка	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	26.06.2003	1,13	2,73
Кулундинский	Константиновка	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	08.07.2002	1,16	1,07
Благовещенский	Благовещенка	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	05.07.2002	1,16	1,31
Завьяловский	Харитоново	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	12.06.2002	1,25	4,92
Тюменцевский	Тюменцево	P <sub>1</sub> -P <sub>2</sub>	01.07.2012	1,28	1,13
Баевский	Нижнечуманка	N <sub>1</sub>	03.07.2002	1,28	1,41
Алейский	Алейск	P <sub>3</sub> <sup>1</sup>	26.07.2001	1,32	1,43
	Боровское	K <sub>2k-m</sub>	25.07.2001	1,32	1,46
Баевский	Чуманка	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	03.07.2002	1,41	1,29
Алейский	Приятельский	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	27.07.2001	1,46	1,44
Ребрихинский	Ребриха	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	05.06.2002	1,53	0,92
Родинский	Ярославцев Лог	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	10.06.2002	1,53	1,95
Мамонтовский	Первомайский	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	06.06.2002	1,6	1,59
Родинский	Ярославцев Лог	N <sub>1</sub>	10.06.2002	1,67	1,75
	Родио	P <sub>3</sub> <sup>2</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	08.06.2002	1,94	1,28
Завьяловский	Светлый	P <sub>3</sub> <sup>2</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	13.06.2002	2,78	3,38
Топчихинский	Топчиха	N <sub>1</sub> <sup>3</sup> -N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	24.07.2001	3,05	0,94

При обработке полученных данных отмечена зависимость концентрации В от концентрации сухого остатка и построена точечная диаграмма (рис. 1). Для определения степени зависимости между концентрациями коэффициент корреляции рассчитывался по формуле

$$r = \frac{\sum(x_i - x_{\text{сред.}})(y_i - y_{\text{сред.}})}{\sqrt{\sum(x_i - x_{\text{сред.}})^2 \times \sum(y_i - y_{\text{сред.}})^2}}$$

где  $x$  – концентрация В;  $y$  – сухой остаток. В этом случае  $r = 0,51228$ .

По показателю рН исследуемые грунтовые воды являются щелочными (рН 7,0–8,7). Как уже отмечалось [7], в щелочных водах концентрация бора может достигать 10 мг/л, что делает такую воду потенциально малоприспособленной для питья.

На основании полученных данных были построены карты распределения В и количества сухого остатка в эксплуатируемых водоносных горизонтах (рис. 2, 3), которые наглядно иллюстрируют характер распределения грунтовых вод с высоким содержанием В. На этих картах показаны аномальные участки, где концентрация В достигает 2,78 и 3,05 мг/л, а сухой остаток составляет 4,92 г/л.

Приведенные картографические данные свидетельствуют о том, что высокие концентрации В (более 0,5 мг/л) соответствуют зоне распространения соленоватых вод, которая занимает практически всю территорию степного Алтая, отнесенную к Кулундинско-Барнаульскому артезианскому бассейну. Этот бассейн расширяется на крайний юго-восток Западно-Сибирской системы артезианских бассейнов и приурочен к предгорной депрессии – Кулундинской впадине, расположенной между Горным

Алтаем на юге, Салаирским кряжем на востоке и северо-востоке и Каменским выступом Кольвано-Томской складчатой зоны на севере. Бассейн сложен морскими и континентальными литологически неоднородными мезокайнозойскими отложениями, мощность которых увеличивается с востока на запад, достигая 1000 м и более. Литологический состав водовмещающих пород и степень их залегания определяются развитием в бассейне порово-пластового давления и безнапорных вод [11].

Высокие концентрации В в подземных водах наблюдаются в 20 административных районах Алтайского края: Поспелихинском, Новичихинском, Ребрихинском, Каменском, Панкрушихинском, Романовском, Волчихинском, Егорьевском, Ключевском, Топчихинском, Шипуновском, Кулундинском, Благовещенском, Калманском, Завьяловском, Тюменцевском, Баевском, Алейском, Родинском и Мамонтовском.

Содержание В в подземных водах этих районов колеблется от 0,53 до 3,05 мг/л, а в Завьяловском и Топчихинском районах имеет максимальное содержание В. Концентрация в некоторых других скважинах превышает 2,0 мг/л.

Распределение соленоватых грунтовых вод географически совпадает с распределением В. Таким образом, следует различать подземные воды по количеству сухого остатка и выделять участки со слабозасоленными грунтовыми водами с содержанием сухого остатка от 1,0 до 3,0 г/л и умеренно соленоватыми водами, характерными для Завьяловского, Новичихинского, Поспелихинского районов, где отмечается сухой остаток, превышающий 3,0 г/л.

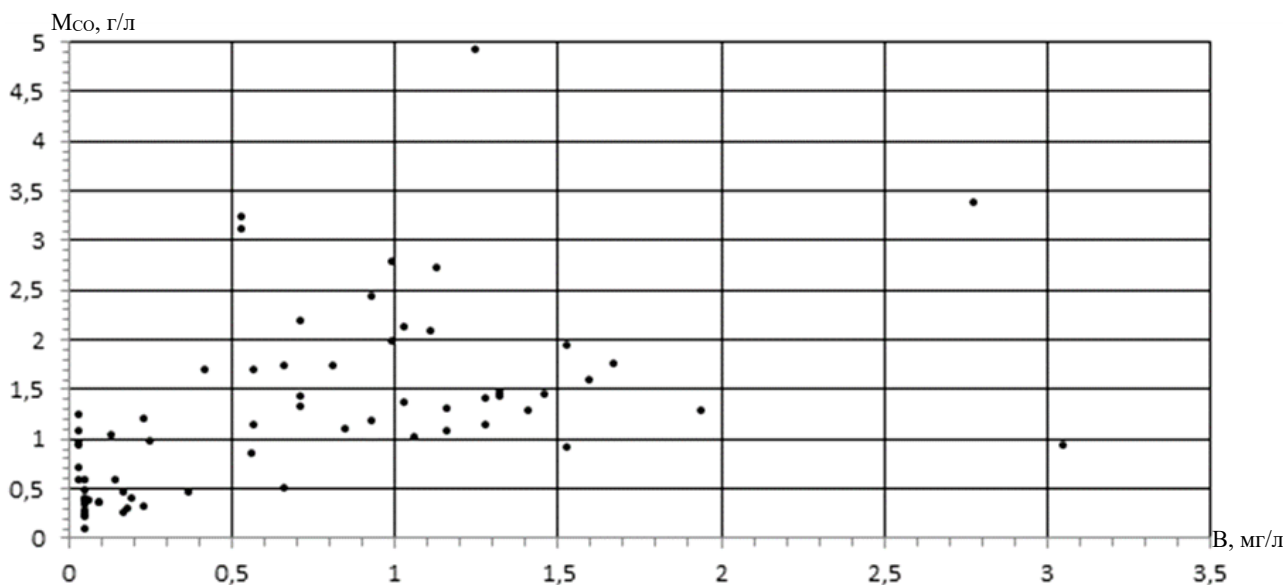


Рис. 1. Зависимость концентрации бора от сухого остатка / Fig. 1. Dependence of boron concentration on dry residue

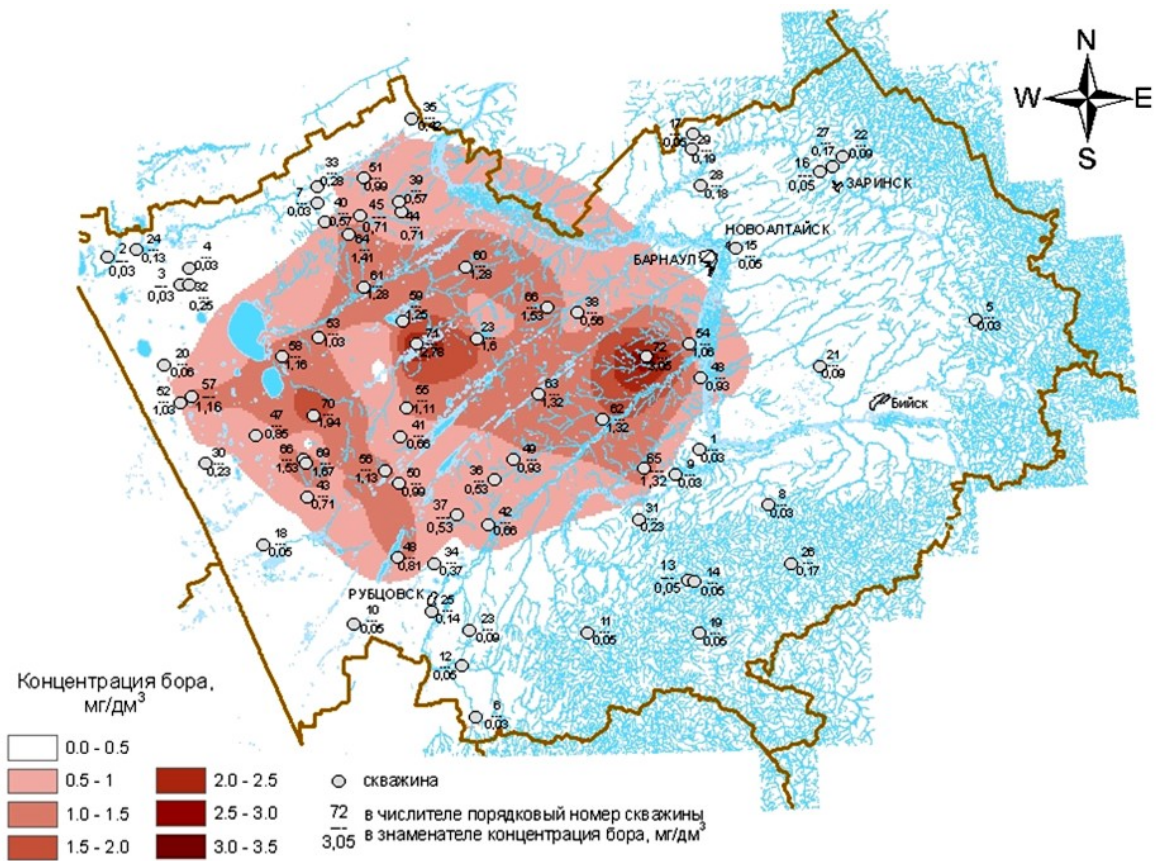


Рис. 2. Распространение бора в подземных водах Алтайского края (масштаб 1:3 000 000)  
 / Fig. 2. Map-diagram of the boron content in groundwater in Altai Region (scale 1:3000000)

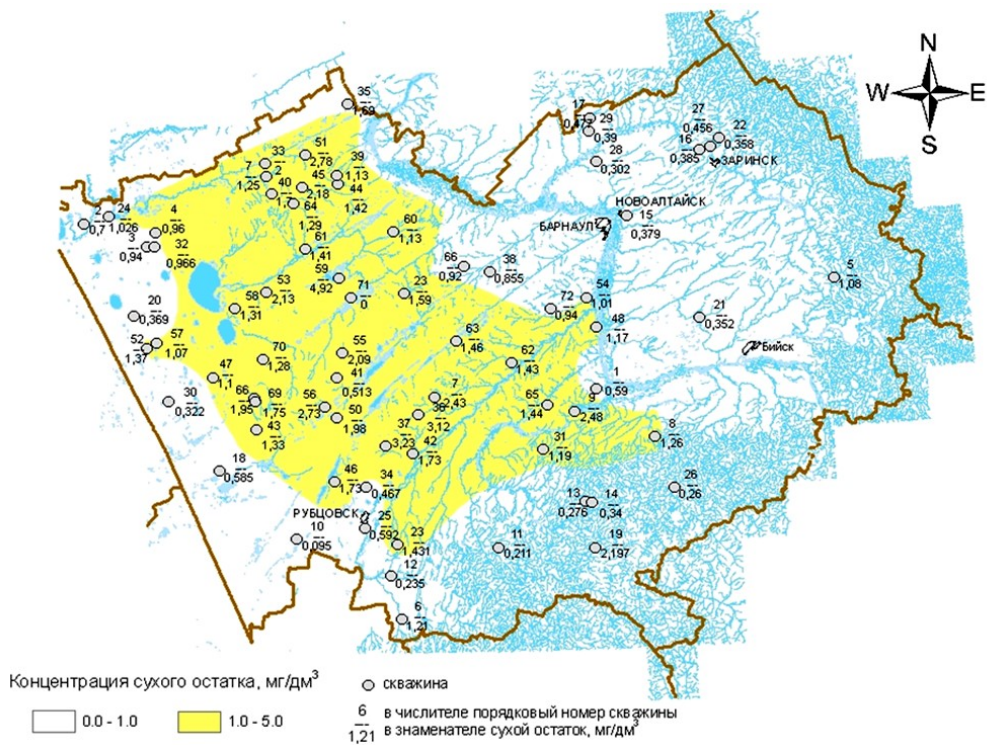


Рис. 3. Количество сухого остатка в подземных водах Алтайского края (масштаб 1: 3 000 000)  
 / Fig. 3. Map of the dry residue content in groundwater in Altai Region (scale 1:3000000)

Превышение ПДК (более 0,5 г/л) в подземных водах Кулундинско-Барнаульского артезианского бассейна обусловлено теми же факторами, что и превышение ПДК сухого остатка (более 1,0 г/л). Эти факторы зависят от затрудненной подпитки водоносных горизонтов пресными водами до наличия глин значительной мощности в водоупорном горизонте. На некоторых участках обнаружена связь подземных вод с водами соленых озер, что вызвало накопление и увеличение концентрации В в грунтовых водах и, как следствие, концентрации сухого остатка.

### Заключение

Таким образом, проведенные нами исследования по определению качества подземных вод на территории Алтайского края свидетельствуют о том, что употребляемая в качестве питьевого водоснабжения вода для многих районов степного Алтая является малоприспособленной для обеспечения бытовых нужд и в значительной степени влияет на здоровье человека, вызывая у ним многие желудочно-кишечные заболевания. Для решения этой проблемы возможно строительство специальных водоводов пресной воды или установка опреснителей.

### Литература

1. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Химия, 1957. 238 с.
2. Ильин В.Б., Аникина А.П. О борном засолении почв // Почвоведение. 1974. № 1. С. 102–108.
3. Крайнов С.Р. Гидрогеохимический метод поисков залежей бора. М.: Недра, 1964. 174 с.
4. Азаренко Ю.А. Закономерности содержания, распределения, взаимосвязи микроэлементов в системе почва – растение в условиях юга Западной Сибири. Омск: Вариант-Омск, 2013. 232 с.
5. Алексеев Л.С., Ивлев Г.А., Аль-Амри З. Очистка подземных вод питьевого назначения от бора // Вестн. МГСУ. 2011. № 8. С. 312–315.
6. Потенциальная опасность бора для здоровья человека. URL: [https://www.water.ru/bz/param/bor.php#:~:text=\(дата обращения: 12.11.2020\)](https://www.water.ru/bz/param/bor.php#:~:text=(дата%20обращения%3A%2012.11.2020).).
7. Посохов Е.В. Формирование химического состава подземных вод. Л.: Гидрометиздат, 1969. 335 с.
8. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованного питьевого водоснабжения. Качество воды. М., 2001. 62 с.
9. Кокорев О.В. Проблема использования борсодержащих подземных вод Удмуртии для питьевых

целей // Трибуна молодого ученого: актуальные проблемы науки глазами молодежи : материалы III Международ. студ. элект. конф. Мурманск: НО АЦНИЭ, 2014. С. 41–42.

10. Рекомендации по применению работ по проекту РОЛЛ № 526-8 «Внедрение методики прогнозирования и предотвращения загрязнения подземных вод в районе г. Кирова». Чебоксары: НИИП и ГГП, 2003. 8 с.

11. Гидрогеология СССР. Кемеровская область и Алтайский край / под ред. М.А. Кузнецова и О.В. Постникова. М.: Недра, 1972. Т. XVII. 399 с.

### References

1. Vinogradov A.P. (1957). *Geochemistry of rare and trace chemical elements in soils*. Moscow, Khimiya Publ., 238 p. (in Russian).
2. Il'in V.B., Anikina A.P. (1974). Boron salinization of soils. *Pochvovedenie*, No. 1, pp. 102-108. (in Russian).
3. Krajnov S.R. (1964). *Hydrogeochemical method of prospecting for boron deposits*. Moscow, Nedra Publ., 174 p. (in Russian).
4. Azarenko Yu.A. (2013). *Regularities of the content, distribution, interrelation of microelements in the soil-plant system in the south of Western Siberia*. Omsk, Variant-Omsk Publ., 232 p. (in Russian).
5. Alekseev L.S., Ivlev G.A., Al'-Amri Z. (2011). Purification of underground waters for drinking purposes from boron. *Vestn. MGSU*, No. 8, pp. 312-315. (in Russian).
6. *The Potential Hazards of Boron to Human Health*. Available at: [https://www.water.ru/bz/param/bor.php#:~:text=\(accessed November 12, 2020\)](https://www.water.ru/bz/param/bor.php#:~:text=(accessed%20November%2012,%202020).).
7. Posohov E.V. (1969). *Formation of the chemical composition of groundwater*. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 335 p. (in Russian).
8. SanPiN 2.1.4.1074-01. *Drinking water. Hygienic requirements for water quality in centralized drinking water supply systems. Water quality*. (2001). Moscow, 62 p. (in Russian).
9. Kokorev O.V. (2014). The problem of using boron-containing groundwater in Udmurtia for drinking purposes. *Tribune of a young scientist: topical problems of science through the eyes of young people*. Proceedings of the Regional Scientific and Practical Conference. Murmansk, Arctic Center for Scientific Research and Expertise Press, pp. 41-42. (in Russian).
10. *Recommendations for the application of work under the ROLL project No. 526-8 "Implementation of the methodology for predicting and preventing groundwater pollution in the Kirov area"*. (2003). Cheboksary, NIIP and GGP Press, 8 p. (in Russian).
11. *Hydrogeology of the USSR. Kemerovo Region and Altai Region*. (1972). M.A. Kuznetsov, O.V. Postnikov (Eds.). Moscow, Nedra Publ., vol. XVII, 399 p. (in Russian).

УДК 549+552.443(571.121)

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-49-55

## АКЦЕССОРНАЯ И РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ СЛАНЦЕВ ИЗ ФУНДАМЕНТА ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ (ЗАПАДНО-ЯРОТИНСКИЙ УЧАСТОК, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)\*

© 2021 г. Ю.В. Ерохин<sup>1</sup>, К.С. Иванов<sup>1</sup>, А.В. Захаров<sup>1</sup>, В.В. Хиллер<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

## ACCESSORY AND ORE MINERALIZATION OF SCHISTS FROM THE BASEMENT OF THE YAMAL PENINSULA (ZAPADNO-YAROTINSKY AREA, WESTERN SIBERIA)

Yu.V. Erokhin<sup>1</sup>, K.S. Ivanov<sup>1</sup>, A.V. Zakharov<sup>1</sup>, V.V. Khiller<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Ерохин Юрий Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, ул. Академика Вонсовского, 15, г. Екатеринбург, 620016, Россия, e-mail: erokhin-yu@yandex.ru

Yuriy V. Erokhin - Candidate of Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Akademika Vonsovskogo St., 15, Yekaterinburg, 620016, Russia, e-mail: erokhin-yu@yandex.ru

Иванов Кирилл Святославич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, ул. Академика Вонсовского, 15, г. Екатеринбург, 620016, Россия, e-mail: ivanovks@igg.uran.ru

Kirill S. Ivanov - Doctor of Geology and Mineralogy, Main Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Akademika Vonsovskogo St., 15, Yekaterinburg, 620016, Russia, e-mail: ivanovks@igg.uran.ru

Захаров Анатолий Владимирович – научный сотрудник, Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, ул. Академика Вонсовского, 15, г. Екатеринбург, 620016, Россия, e-mail: zakharov-zav@yandex.ru

Anatoliy V. Zakharov - Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Akademika Vonsovskogo St., 15, Yekaterinburg, 620016, Russia, e-mail: zakharov-zav@yandex.ru

Хиллер Вера Витальевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, ул. Академика Вонсовского, 15, г. Екатеринбург, 620016, Россия, e-mail: hilvervit@mail.ru

Vera V. Khiller - Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Akademika Vonsovskogo St., 15, Yekaterinburg, 620016, Russia, e-mail: hilvervit@mail.ru

Приводятся результаты изучения минералогии метаморфических сланцев из доюрского основания арктической части Западно-Сибирской плиты. Исследована акцессорная и рудная минерализация сланцев из Западно-Яротинского лицензионного участка, расположенного в южной части полуострова Ямал. Сланцы вскрыты скважиной Западно-Яротинская № 300 на глубине 2762 м. Выше по разрезу метаморфические породы перекрыты молодым мезокайнозойским чехлом. Сланцы в основном сложены кварцем, плагиоклазом (альбитом), карбонатами (доломитом и сидеритом), слюдой (мусковитом) и хлоритом (донбасситом). Обнаруженные акцессорные и рудные минералы в метаморфических сланцах Западно-Яротинского участка можно поделить на две группы. В первую группу входят минералы, которые формировались при метаморфизме сланцев либо сохранились как детритовое вещество. К этим минералам относятся циркон, фторопатит и рутил как наиболее устойчивые соединения. Остальная минера-

\* Исследования проведены при поддержке РФФИ (проект № 18-05-70016) / The research was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-70016).

лизация (пирит, сфалерит, халькопирит, кубанит, галенит, кобальтин, барит, ксенотим-(Y), гоэцит, синхизит-(Nd), самородные серебро и медь) является явно вторичной и формировалась в результате наложенных метасоматических процессов. Судя из описанной минералогии, сланцы подверглись изменениям в результате наложенной пропилитизации. Температурный интервал данного процесса определяется образованием кубанита в ассоциации с халькопиритом при температуре 200–210 °С.

**Ключевые слова:** минералогия, сланцы, фундамент, Западно-Яротинский участок, полуостров Ямал, Западная Сибирь.

*The results of studying the mineralogy of metamorphic schists from the Pre-Jurassic base of the Arctic part of the West Siberian plate are presented. The accessory and ore mineralization of schists from the Zapadno-Yarotinsky license area located in the southern part of the Yamal Peninsula is studied. The schists was uncovered by the Zapadno-Yarotinskaya No. 300 well at a depth of 2762 m. Above the section, the metamorphic rocks are overlain by a young Meso-Cenozoic cover. The schists are mainly composed of quartz, plagioclase (albite), carbonates (dolomite and siderite), mica (muscovite) and chlorite (donbassite). The discovered accessory and ore minerals in the metamorphic schists of the Zapadno-Yarotinsky area can be divided into two groups. The first group includes minerals that were formed during the metamorphism of schists, or were preserved as detrital matter. These minerals include zircon, fluorapatite, and rutile as the most stable compounds. The remaining mineralization (pyrite, sphalerite, chalcopyrite, cubanite, galena, cobaltite, barite, xenotime-(Y), goyazite, synchysite-(Nd), native silver and copper) is clearly secondary and was formed as a result of superimposed metasomatic processes. Judging from the described mineralogy, the schists underwent changes as a result of superimposed propylitization. The temperature range of this process is determined by the formation of cubanite in association with chalcopyrite at a temperature of 200-210 °C.*

**Keywords:** mineralogy, schists, basement, Zapadno-Yarotinsky area, Yamal Peninsula, Western Siberia.

## Введение

Исследования геологии северных территорий России, в том числе и Арктики, приобрели в последнее время особую важность, в том числе в связи с потенциальной нефтегазоносностью этого огромного и пока еще недостаточно изученного региона. Особая актуальность изучения геологического строения территории связана с возможно предстоящим разделом континентального шельфа Северного Ледовитого океана между расположенными и граничащими здесь странами. Важнейшим юридическим критерием при этом являются, как известно, результаты исследования фундамента осадочных бассейнов Арктики.

Полуостров Ямал – главная газовая провинция нашей страны, где кристаллический фундамент пусть и с большим трудом, но все же доступен для непосредственного изучения. Фундаменты нефтегазоносных провинций остаются пока одними из немногих в той или иной мере перспективных, но недостаточно изученных объектов, причем наиболее многообещающими для поиска углеводородов являются гранитоиды и их метаморфическое обрамление [1–3] и др.

Ниже приводятся результаты исследования акцессорной и рудной минерализации сланцев из доюрского основания Западно-Яротинского лицензионного участка (скважина № 300), расположенного в южной части полуострова Ямал.

## Методы исследования

Все аналитические работы были проведены в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург). Химический состав части минералов определялся на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (аналитик В.В. Хиллер). Химический состав других минералов определен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Л.В. Леонова). На этих же двух приборах были сделаны фотографии минералов в режиме BSE (обратно рассеянных электронов). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из керна сланцев.

## Объект исследования

Западно-Яротинский лицензионный участок расположен в пределах южной части полуострова Ямал, примерно в 60–65 км северо-западнее села Новый Порт, заложенного на восточном берегу полуострова. Изученная нами скважина Западно-Яротинская № 300 находится примерно в 50 км севернее Верхнереченской скв. № 1 (рис. 1). В скважине № 300 в интервалах доюрского фундамента вскрыты кварц-серицитовые сланцы, что позволяет нам рассматривать их как северное метаморфиче-

ское обрамление Верхнереченского гранитного массива (возможно, они расположены в зоне экзоконтакта), который детально изучался ранее [4].

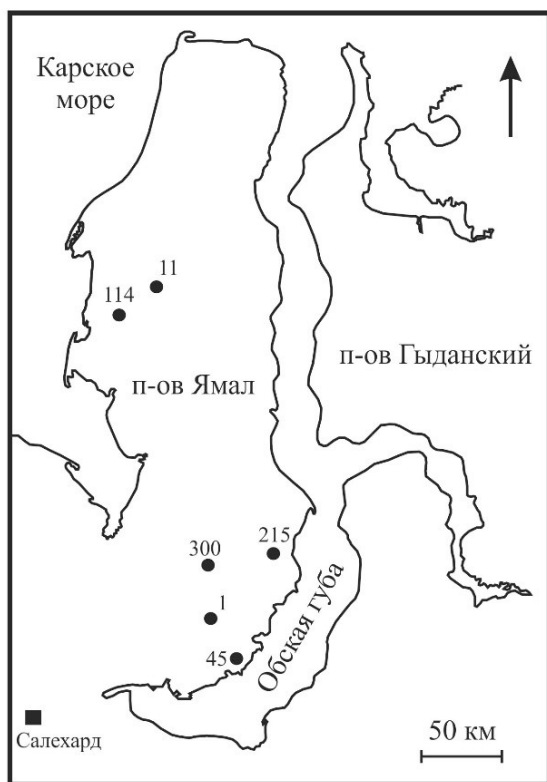


Рис. 1. Схема расположения скважин, вскрывших палеозой, на полуострове Ямал: 300 – Западно-Яротинская; 1 – Верхнереченская; 11 – Восточно-Бованенковская; 45 – Сюнай-Салинская; 114 – Бованенковская; 215 – Новопортовская / Fig. 1. Scheme location wells penetrating Paleozoic, the Yamal Peninsula: 300 - Zapadno-Yarotinskaya; 1 - Verkhnerenchenskaya; 11 - Vostochno-Bovanenkovskaya; 45 - Syunai-Salinskaya; 114 - Bovanenkovskaya; 215 - Novoportovskaya

### Результаты исследования

Западно-Яротинская скважина № 300 на глубине 2762 м вскрыла темно-серые сильнодеформированные (местами смятые в мелкие плейчатые складки) метаморфические сланцы, которые сформировались по осадочному субстрату. Главные минералы, которыми сложены метаморфические сланцы, представлены кварцем, плагиоклазом, карбонатом, слюдой и хлоритом [3]. Прослои, состоящие из хлорит-сланцистого агрегата с резко подчиненным количеством кварца и плагиоклаза, имеют микролепидобластовую структуру, а альбит-кварцевые прослои – микрогранобластовую. Чередование тех и других прослоев создает полосчатую текстуру, а альбит-кварцевые прослои в отдельности образуют мелкоплейчатую текстуру.

Плагиоклаз преобладает над кварцем, образует скопления мелких зерен, размером до 200 мкм, и относится к чистому альбиту. Слюда образует бесцветные лейсты до 1–2 мм в длину и является мусковитом. Хлорит также слагает самостоятельные лейсты размером до 1–2 мм в длину, которые часто переслаиваются со слюдой. По составу хлорит относится к чисто глиноземистой разновидности и является донбасситом. Количество карбоната в породе достаточно велико (примерно до 10–15 об. %). В основном это полосовидные скопления, вытянутые по сланцеватости породы, сложенные доломитом с FeO до 13,6 мас. % и MnO до 1,1 мас. %. Кроме того, в породе отмечаются линзочки сидерита с содержанием MgO до 16,5 мас. %, CaO до 1,6 мас. % и MnO до 0,5 мас. %.

Из акцессорных минералов в породе отмечают рутил, циркон, ксенотим, апатит, гоэцит, барит, а рудная минерализация представлена сульфидами (пирит, халькопирит, кубанит, сфалерит, галенит и кобальтин) и самородными металлами (медь и серебро). Кроме того, в породе обнаружен редкоземельный фторкарбонат – синхизит.

Рутил в сланце является одним из главных акцессорных минералов, обычно встречается в виде единичных индивидов размером до 0,2 мм, хотя обычно слагает более мелкую вкрапленность с зернами до 10–20 мкм. По данным микрозондового изучения, минерал содержит примеси хрома ( $Cr_2O_3$  до 1,3 мас. %), ванадия ( $V_2O_5$  до 0,9 мас. %) и железа ( $Fe_2O_3$  до 0,7 мас. %). Обычно рутил ни с кем не ассоциирует, но иногда содержит вкрапленность галенита.

Циркон в сланце встречается крайне редко и обычно слагает хорошо образованные короткопризматические кристаллы размером до 10 мкм по удлинению (рис. 2). Реже встречаются индивиды циркона с закономерным обрастанием ксеноти́ма. По данным микрозондового анализа, в цирконе отмечаются постоянные примеси гафния ( $HfO_2$  до 2,3 мас. %), урана ( $UO_2$  до 1,2 мас. %) и тория ( $ThO_2$  до 1,1 мас. %). При этом отдельные кристаллы циркона обогащены только гафнием, а индивиды с ксенотимом содержат все примеси.

Ксенотим-(Y) в сланце встречается только в сростании с цирконом, где он закономерно обрастает ребра кристаллов силиката циркония. Размер зерен не превышает 2–3 мкм в поперечнике. По данным микрозондового изучения, минерал соответствует ксенотиму-(Y), так как характеризуется высоким содержанием иттрия ( $Y_2O_3$  до 42 мас. %) и фосфора ( $P_2O_5$  до 32,9 мас. %). Из примесей отмечаются тяжелые редкие земли ( $Gd_2O_3$  до 1,7 мас. %;  $Dy_2O_3$  до 3 мас. %;  $Er_2O_3$  до 1,6 мас. %;  $Yb_2O_3$  до 1,5 мас. %), а также торий ( $ThO_2$  до

3,7 мас. %) и уран ( $UO_2$  до 1,9 мас. %). Кроме того, есть небольшие примеси кальция и кремнезема. В целом ксенотим ведет себя как вторичный минерал, так как он обрастает индивиды циркона.

**Фторапатит** слагает нормальные короткопризматические индивиды размером до 100–150 мкм по удлинению, ориентированные согласно сланцеватости породы. По химическому составу фосфат кальция определяется как фторапатит (содержит до 2,8 мас. % фтора, а так как хлор в минерале не обнаружен, то кристаллохимический пересчет показывает 75 % минала фторапатита и 25 % гидроксипапатита). Из примесей в минерале отмечаются FeO до 0,14 мас. % и MnO до 0,04 мас. %. Индивиды апатита часто обрастают более сложным по составу редкоземельным фосфатом – гояцитом (рис. 3).

**Гояцит** был детально описан нами ранее [3, 5]. Он образует мелкие слабоудлиненные зерна и скопления, размером до 50 мкм, в матрице сланца, обычно тяготея к индивидам фторапатита (рис. 3). По данным микрозондового анализа, минерал имеет варьирующий химический состав, и по соотношению стронция и РЗЭ можно выделить два типа данного минерала: более стронциевый и, соответственно, редкоземельный. Первый тип обрастает индивиды фторапатита и содержит до 64 % минала гояцита, а второй тип встречается в виде самостоятельных выделений в матрице сланца и содержит до 42 % минала гояцита. В целом гояцит – достаточно редкий минерал, хотя и часто встречается в карбонатах, гранитных и щелочных пегматитах, аргиллизитах, вторичных кварцитах и гидротермальных жилах [6–8] и др.

**Барит** в сланцах встречается редко и слагает небольшие скопления размером не более 10 мкм. Легко узнается благодаря своей светлой окраске в режиме BSE и по наличию всего двух основных пиков – бария и серы. Из примесей в сульфате отмечаются SrO до 1,2 мас. % и CaO до 0,3 мас. %. Барит имеет явно вторичный генезис, так как обычно в породе располагается на границе плагиоклаза и слюды, т.е. вероятно, барий был сброшен из первичного полевого шпата.

**Пирит**, как главный минерал сульфидной минерализации, в породе резко преобладает, слагая как крупные скопления, размером до 0,5 мм, так и мелкие хорошо образованные кристаллы. В отдельных индивидах пирита отмечается слабая зональность. Химический состав сульфида отличается чистотой и практически не содержит примесей, за исключением некоторых кристаллов, где в центральной зоне присутствует примесь Ni до 0,4 мас. %. Часто сростается с халькопиритом.



Рис. 2. Кристалл циркона (светло-серый) в сланце. BSE-фото, СЭМ JSM-6390LV / Fig. 2. Zircon crystal (light gray) in schists. BSE-photo, SEM JSM-6390LV

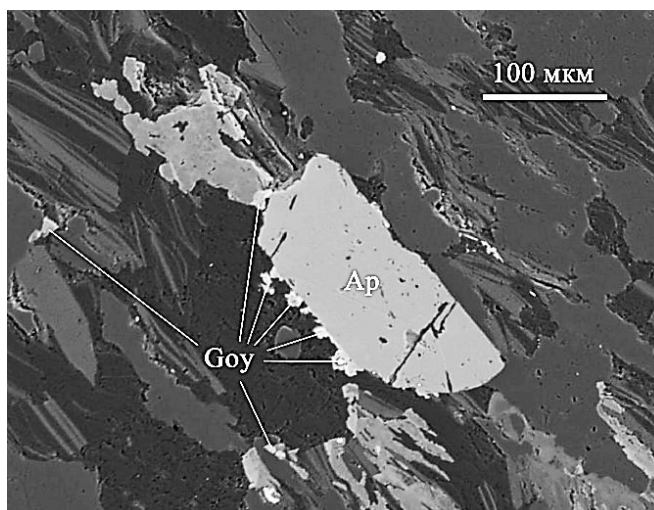


Рис. 3. Апатит (Ap), обрастающий зернами гояцита (Goy). BSE-фото, CAMECA SX 100 / Fig. 3. Apatite (Ap) overgrown with goyazite (Goy) grains. BSE-photo, CAMECA SX 100

**Халькопирит** в породе встречается значительно реже пирита. Он отмечается в краевых частях скоплений сульфида железа, слагая ксеноморфные зерна размером до 50 мкм, а также образует мелкую самостоятельную вкрапленность в сланце. По составу халькопирит вполне стехиометричен (S – 35,53 %; Fe – 30,19 %; Cu – 34,28 %), в нём отсутствуют какие-либо примеси. Минеральных включений не содержит.

**Кубанит** в породе образует переходные каймы (до 1–2 мкм) на границе агрегатов пирита и халькопирита. По данным микрозондового анализа (S – 34,96 %; Fe – 41,44 %; Cu – 23,52 %), сульфид определяется как соединение с кристаллохимиче-

ской формулой –  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$ , т.е. является либо кубанитом (ромбический), либо изокубанитом (кубический). Состав сульфида близок к стехиометричному и относится к низкотемпературному ромбическому кубаниту [9].

*Сфалерит* так же, как и пирит, является главным сульфидным минералом породы и слагает крупные зерна, размером до 300 мкм в диаметре. При этом сфалерит не содержит каких-либо минеральных включений и не ассоциирует с другими сульфидами. По химическому составу он достаточно чистый и характеризуется только небольшим присутствием Fe до 1,2 мас. %, т.е. является клейофаном.

*Галенит* образует в матрице породы мелкие включения, размером до 5 мкм, причем зерна обычно приурочены к рутилу или карбонатам. В BSE-изображении галенит обладает наиболее яркой окраской в сравнении с другими минералами. По химическому составу сульфид легко определяется как галенит, так как содержит только серу и свинец.

*Кобальтин* образует редкие отдельные зерна размером до 10–15 мкм в матрице сланца. Обычно он приурочен к скоплениям доломита (рис. 4). По данным микрозондового изучения (S – 20,68–21,30 %; As – 44,48–45,07 %; Fe – 3,51–4,31 %; Co – 24,05–27,05 %; Ni – 3,35–4,98 %), вполне уверенно определяется как кобальтин. Подобный кобальтин описывался в сланцах доюрского фундамента Шаимского района из Приуральской части Западной Сибири [10] и в хрусталеносных жилах Приполярного Урала [11]. В целом кобальтин является редким минералом и встречается в хлоритизированных диабазах, серпентинитах, скарнах,

гидротермальных жилах, а также в медноколчеданных и меднопорфировых месторождениях [12, 13] и др.

*Медь* слагает крайне редкую вкрапленность в карбонатных скоплениях размером до 1–2 мкм в матрице сланца. По данным микрозондового анализа, не содержит каких-либо примесей. С другими рудными минералами не ассоциирует.

*Серебро* так же, как и медь, слагает крайне редкую вкрапленность размером до 1–2 мкм в матрице сланца. По химическому составу имеет 100%-ю пробность и не содержит каких-либо примесей. Серебро приурочено исключительно к скоплениям галенита, и, по всей видимости, металл и сульфид свинца кристаллизовались одновременно.

*Синхизит-(Nd)* образует ксеноморфные скопления размером до 50 мкм в матрице сланца. Обычно он приурочен к скоплениям сидерита (рис. 5). Имеет следующий химический состав, мас. %:  $\text{ThO}_2$  – 4,20;  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 4,70;  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  – 15,62;  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  – 2,61;  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 16,30;  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  – 3,83;  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  – 3,83;  $\text{Y}_2\text{O}_3$  – 1,11; CaO – 17,21;  $\text{CO}_2$  – 27,22; F – 6,42;  $\text{O}\equiv\text{F}_2$  – 2,70; сумма 100,35. Содержание  $\text{CO}_2$  приведено по теоретической формуле минерала. Полученная кристаллохимическая формула –  $\text{Ca}_{0,99}(\text{Nd}_{0,31}\text{Ce}_{0,30}\text{La}_{0,09}\text{Sm}_{0,07}\text{Gd}_{0,07}\text{Pr}_{0,05}\text{Th}_{0,05}\text{Y}_{0,03})_{0,97}(\text{CO}_3)_{1,97}\text{F}_{1,07}$  – позволяет утверждать, что это неодимовая разновидность синхизита [14].

В целом этот редкоземельный фторкарбонат является характерным аутигенным минералом осадочных пород и бокситов, а также встречается как низкотемпературный карбонат в пегматитах и других метасоматитах [15, 16] и др.

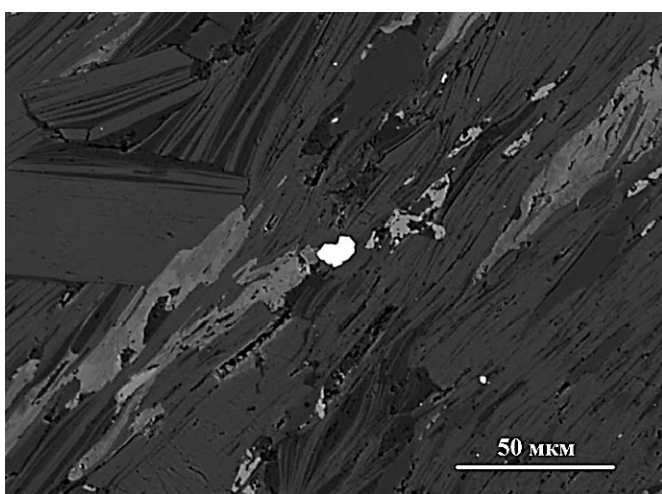


Рис. 4. Зерно кобальтина (серое) в сланце. BSE-фото, CAMECA SX 100 / Fig. 4. Cobaltite grain (gray) in schists. BSE-photo, CAMECA SX 100

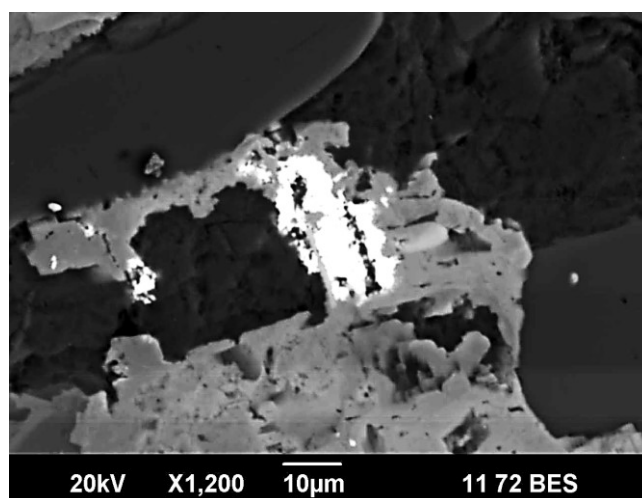


Рис. 5. Синхизит (белое) в сланце. BSE-фото, СЭМ JSM-6390LV / Fig 5. Synchysite (white) in schists. BSE-photo, SEM JSM-6390LV

## Обсуждение результатов исследования

Исследованные акцессорные и рудные минералы метаморфических сланцев из доюрского фундамента Западно-Яротинского лицензионного участка Южного Ямала можно поделить на две группы. В первую группу входят минералы, которые формировались при метаморфизме сланцев либо сохранились как детритовое вещество. К этим минералам можно уверенно отнести циркон, фторапатит и рутил. Остальная минерализация (сульфидная, сульфоарсенидная, РЗЭ-фосфатная, РЗЭ-карбонатная и металлы) является явно вторичной и формировалась в результате наложенных метасоматических процессов.

Судя по описанной и ранее приведенной минералогии [3], сланцы Западно-Яротинского участка образовались в условиях зеленосланцевого метаморфизма и позднее подверглись изменениям в процессе наложенной пропилитизации, которая, как известно [17], проявляется в широком развитии хлорита, карбонатов, альбита (или адуляра), кварца и сульфидной минерализации. Разнообразная сульфидная, РЗЭ-фосфатная и РЗЭ-карбонатная минерализация в сланцах как раз и могла образоваться в результате проработки поздними низкотемпературными растворами, в результате которой формировались пропилиты по сланцам. Этот низкотемпературный метасоматоз активно проходит в Западной Сибири на стыке мезокайнозойского водонасыщенного осадочного чехла с нижележащим доюрским комплексом фундамента [18]. Температурный интервал данного процесса четко фиксируется сульфидными термометрами, к примеру, образование кубанита в ассоциации с халькопиритом происходит при температуре 200–210 °C [19].

## Заключение

Таким образом, мы изучили акцессорную и рудную минерализацию параметаморфических сланцев из доюрского фундамента Западно-Яротинского лицензионного участка, расположенного в южной части полуострова Ямал. Сами сланцы формировались в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма и подверглись вторичным изменениям в виде наложенной пропилитизации. В результате этого низкотемпературного метасоматического процесса (температура примерно 200–210 °C) образовалась интересная и разнообразная минерализация, представленная сульфидами, сульфоарсенидами, РЗЭ-фосфатами, РЗЭ-фторкарбонатами и металлами.

## Литература

1. Арешев Е.Г., Гаврилов В.П., Донг Ч.Л., Зао Н., Попов О.К., Поспелов В.В., Шан Н.Т., Шнип О.А. Геология и нефтегазоносность фундамента Зондского шельфа. М.: Нефть и газ, 1997. 288 с.
2. Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Ронкин Ю.Л., Хиллер В.В., Родионов Н.В., Лепихина О.П. Первые сведения о раннепротерозойском сиалическом фундаменте на востоке Западно-Сибирской платформы (результаты исследования Тыньярского риолит-гранитного массива) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 10. С. 1304–1321.
3. Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Иванов К.С., Рыльков С.А., Бочкарев В.С. Минералогия метаморфических сланцев из доюрского основания южной части полуострова Ямал // Литосфера. 2014. № 5. С. 136–140.
4. Вотяков С.Л., Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Бочкарев В.С., Захаров А.В., Коротков С.А. Вещественный состав и химическое микрозондовое Th-U-Pb-датирование гранитов из фундамента полуострова Ямал // Литосфера. 2013. № 3. С. 57–66.
5. Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Бочкарев В.С. Гояцит из метаморфических сланцев доюрского основания Западно-Яротинской площади полуострова Ямал // Горные ведомости. 2015. № 3 (130). С. 14–19.
6. Dill H.G., Fricke A., Henning K.-H. The origin of Ba- and REE-bearing aluminium-phosphate-sulphate minerals from the Lohrheim kaolinitic clay deposit (Rheinisches Schiefergebirge, Germany) // Applied Clay Science. 1995. Vol. 10. P. 231–245.
7. McKie D. Goyazite and florencite from two African carbonatites // Mineralogical Magazine. 1962. Vol. 33. P. 281–297.
8. Izbrodin I.A., Ripp G.S., Doroshkevich A.G. Aluminium phosphate and phosphate-sulphate minerals in kyanite schists of the Ichetuyskoye area, West Transbaikalia, Russia: crystal chemistry and evolution // Mineralogy and Petrology. 2010. Vol. 101. P. 81–96.
9. Nenashva S.N., Kravchenko T.A. Composition features of isocubanite and polymorphous modifications of CuFe<sub>2</sub>S<sub>3</sub> compound // Geology of Ore Deposits. 2015. Vol. 57. P. 626–633.
10. Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Кобальтовая сульфоарсенидная минерализация из «гранито-сланцевой оси» Шаимского района (Западная Сибирь) // Вестн. Уральского отделения РМО. 2010. № 7. С. 131–134.
11. Иванов О.К., Литошко Д.Н., Бурлаков Е.В. Кобальтин // Минералогия Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 20–24.
12. Мелекесцева И.Ю. Гетерогенные кобальт-медноколчеданные месторождения в ультрамафитах палеоостроводужных структур. М.: Наука, 2007. 245 с.
13. Choi S.G., Imai N. Ni-Fe-Co arsenides and sulpharsenides from the Ulsan mine, Republic of Korea // Mining Geology. 1985. Vol. 35, № 189. P. 1–16.

14. Scharm B., Kühn P. Synchysite-(Nd), Ca(Nd,Y,Gd,...)[F](CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, a new mineral // Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte. 1983. P. 201–210.

15. Andersen T. Compositional variation of some rare earth minerals from the Fen complex (Telemark, SE Norway): implications for the mobility of rare earths in a carbonatite system // Mineralogical Magazine. 1986. Vol. 50. P. 503–509.

16. Palenzona A., Martinelli A. Sinchisite-(Nd) al Vallone del Triolet, Courmayeur, Aosta // Rivista Mineralogica Italiana. 2009. № 9. P. 122–124.

17. Рыка В., Малишевская А. Петрографический словарь. М.: Недра, 1989. 590 с.

18. Иванов К.С., Писецкий В.Б., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Погромская О.Э. Геологическое строение и флюидодинамика фундамента Западной Сибири (на востоке ХМАО). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2016. 242 с.

19. Костов И., Минчева-Стефанова Й. Сульфидные минералы. Кристаллохимия, парагенезис, систематика. М.: Мир, 1984. 281 с.

#### References

1. Areshev E.G., Gavrilov V.P., Dong Ch.L., Zao N., Popov O.K., Pospelov V.V., Shan N.T., Shnip O.A. (1997). *Geology and oil and gas content of the Zond shelf basement*. Moscow, Neft' i gas Publ., 288 p. (in Russian).

2. Ivanov K.S., Erokhin Yu.V., Ronkin Yu.L., Khiller V.V., Rodionov N.V., Lepikhina O.P. (2012). The first data on the Early Proterozoic sialic basement in the eastern West Siberian Platform (studies of the Tyn'yar rhyolite-granite pluton). *Russian Geology and Geophysics*, vol. 53, No. 10, pp. 997-1011.

3. Erokhin Yu.V., Khiller V.V., Ivanov K.S., Ryl'kov S.A., Bochkarev V.S. (2014). Mineralogy of metamorphic schists from the Pre-Jurassic basement of the southern Yamal Peninsula. *Litosfera*, No. 5, pp. 136-140. (in Russian).

4. Votyakov S.L., Ivanov K.S., Erokhin Yu.V., Khiller V.V., Bochkarev V.S., Zakharov A.V., Korotkov S.A. (2013). Material composition and chemical microprobe Th-U-Pb dating of granites from the basement of the Yamal Peninsula. *Litosfera*, No. 3, pp. 57-66. (in Russian).

5. Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Bochkarev V.S. (2015). Goyazite from metamorphic schists of the pre-Jurassic basement Zapadno-Yarotinsky area of the Yamal Peninsula. *Gornye vedomosti*, No. 3 (130), pp. 14-19. (in Russian).

6. Dill H.G., Fricke A., Henning K.-H. (1995). The origin of Ba- and REE-bearing aluminium-phosphate-

sulphate minerals from the Lohrheim kaolinitic clay deposit (Rheinisches Schiefergebirge, Germany). *Applied Clay Science*, vol. 10, pp. 231-245.

7. McKie D. (1962). Goyazite and florencite from two African carbonatites. *Mineralogical Magazine*, vol. 33, pp. 281-297.

8. Izbrodin I.A., Ripp G.S., Doroshkevich A.G. (2010). Aluminium phosphate and phosphate-sulphate minerals in kyanite schists of the Ichetuyskoye area, West Transbaikalia, Russia: crystal chemistry and evolution. *Mineralogy and Petrology*, vol. 101, pp. 81-96.

9. Nenasheva S.N., Kravchenko T.A. (2015). Composition features of isocubanite and polymorphous modifications of CuFe<sub>2</sub>S<sub>3</sub> compound. *Geology of Ore Deposits*, vol. 57, pp. 626-633.

10. Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V., Khiller V.V. (2010). Sulpharsenide cobalt mineralization from "the granite and schists axis" Shaim region (West Siberia). *Vestnik Ural'skogo otdeleniya RMO*, No. 7, pp. 131-134. (in Russian).

11. Ivanov O.K., Litoshko D.N., Burlakov E.V. (1990). Cobaltite. *Mineralogy of the Urals*. Sverdlovsk, UB AN USSR Press, pp. 20-24. (in Russian).

12. Melekestseva I.Yu. (2007). *Heterogeneous cobalt-bearing massive sulfide deposits in ultramafic rocks from the paleoisland-arc structures*. Moscow, Nauka Publ., 245 p. (in Russian).

13. Choi S.G., Imai N. (1985). Ni-Fe-Co arsenides and sulpharsenides from the Ulsan mine, Republic of Korea. *Mining Geology*, vol. 35, No. 189, pp. 1-16.

14. Scharm B., Kühn P. (1983). Synchysite-(Nd), Ca(Nd,Y,Gd,...) [F](CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, a new mineral. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte*, pp. 201-210.

15. Andersen T. (1986). Compositional variation of some rare earth minerals from the Fen complex (Telemark, SE Norway): implications for the mobility of rare earths in a carbonatite system. *Mineralogical Magazine*, vol. 50, pp. 503-509.

16. Palenzona A., Martinelli A. (2009). Sinchisite-(Nd) al Vallone del Triolet, Courmayeur, Aosta. *Rivista Mineralogica Italiana*, No. 9, pp. 122-124.

17. Ryka W., Maliszewska A. (1989). *Petrographic Dictionary*. Moscow, Nedra Publ., 590 p. (in Russian).

18. Ivanov K.S., Pisetskiy V.B., Erokhin Yu.V., Khiller V.V., Pogromskaya O.E. (2016). Geological structure and fluid dynamics of the basement of Western Siberia (in the east of the KhMAO). Yekaterinburg, IGG UB RAS Press, 242 p. (in Russian).

19. Kostov I., Mincheva-Stefanova I. (1984). *Sulfide minerals. Crystal chemistry, parageneses, systematics*. Moscow, Mir Publ., 281 p. (in Russian).

УДК 502.171:546.212:574.58

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-56-65

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВОДООХРАННОЙ ЗОНЫ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2021 г. *О.В. Ивлиева*<sup>1,2</sup>, *Л.А. Беспалова*<sup>1,2</sup>, *В.В. Глинка*<sup>1</sup>, *Л.В. Сердюк*<sup>1</sup>, *А.А. Чмыхов*<sup>1</sup><sup>1</sup>Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр, Ростов-на-Дону, Россия,<sup>2</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

## THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TO ASSESS THE INTENSITY OF MANIFESTATION OF DANGEROUS COASTAL PROCESSES IN THE WATER PROTECTION ZONE OF THE TSIMLYANSK RESERVOIR

*O.V. Ivlieva*<sup>1,2</sup>, *L.A. Bepalova*<sup>1,2</sup>, *V.V. Glinka*<sup>1</sup>, *L.V. Serdyuk*<sup>1</sup>, *A.A. Chmykhov*<sup>1</sup><sup>1</sup>Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre, Rostov-on-Don, Russia,<sup>2</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

*Ивлиева Ольга Васильевна* – доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр, ул. Филимоновская, 174, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия; профессор, кафедра туризма, Высшая школа бизнеса, Южный федеральный университет, ул. 23-я линия, 43, г. Ростов-на-Дону, 344019, Россия, e-mail: ivleva.o@mail.ru

*Olga V. Ivlieva* - Doctor of Geography, Associate Professor, Leading Researcher, Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre, Filimonovskaya St., 174, Rostov-on-Don, 344000, Russia; Professor, Department of Tourism, Higher Business School, Southern Federal University, 23-ya Liniya St., 43, Rostov-on-Don, 344019, Russia, e-mail: ivleva.o@mail.ru

*Беспалова Людмила Александровна* – доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр, ул. Филимоновская, 174, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия; профессор, кафедра океанологии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: beshpalowaliudmila@yandex.ru

*Lyudmila A. Bepalova* - Doctor of Geography, Associate Professor, Leading Researcher, Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre, Filimonovskaya St., 174, Rostov-on-Don, 344000, Russia; Professor, Department of Oceanology, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: beshpalowaliudmila@yandex.ru

*Глинка Вадим Васильевич* – ведущий инженер, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр, ул. Филимоновская, 174, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия; аспирант, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: arhangel-vadim@mail.ru

*Vadim V. Glinka* - Leading Engineer, Russian Information-Analytical and Research Water Management Center, Filimonovskaya St., 174, Rostov-on-Don, 344000, Russia; Postgraduate, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: arhangel-vadim@mail.ru

*Сердюк Лариса Владимировна* – кандидат географических наук, главный специалист, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр, ул. Филимоновская, 174, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: larisa-kropyanko@yandex.ru

*Larisa V. Serdyuk* - Candidate of Geography, Main Specialist, Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre, Filimonovskaya St., 174, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: larisa-kropyanko@yandex.ru

Чмыхов Александр Анатольевич – заведующий отделом разработки автоматизированных информационных систем и информационных технологий в водном хозяйстве, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр, ул. Филимоновская, 174, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: rwec@rwec.ru

Alexander A. Chmykhov - Division Head of the Development of the Automated Information Systems and Information Technologies in the Water Management, Russian Information-Analytic and Research Water Economy Centre, Filimonovskaya St., 174, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: rwec@rwec.ru

Объектом исследований является водоохранная зона (ВЗ) Цимлянского водохранилища, предметом – оценка интенсивности проявления опасных береговых процессов водохранилища: абразионно-оползневой, эрозионной деятельности. Разработана и апробирована методика проведения мониторинга эрозионных процессов ВЗ водных объектов с использованием программно-аппаратного комплекса, созданного на базе беспилотных летательных аппаратов и ГИС-технологий. Определен оптимальный тип цифровых моделей рельефа для оценки густоты эрозионной сети, определения типов берегов и интенсивности проявления абразионных и оползневых процессов, измерения морфометрических характеристик эрозионных форм рельефа. Выделены типы эрозионных форм рельефа и проведено районирование территории ВЗ Цимлянского водохранилища по густоте эрозионного расчленения. Исследования показали, что преобладающими эрозионными формами рельефа ВЗ Цимлянского водохранилища являются овраги и балки. Максимальное среднее значение густоты эрозионной сети рельефа в границах административных районов побережья водохранилища приходится на Суrowsкий район. В Калачёвском районе отмечается максимальное значение густоты эрозионной сети в пределах ВЗ Цимлянского водохранилища.

**Ключевые слова:** опасные береговые процессы, густота эрозионной сети, ортофотоплан, беспилотный летательный аппарат, цифровая модель рельефа.

The water protection zone of the Tsimlyansk reservoir was chosen as the object of research. The subject of the study was the assessment of the intensity of manifestation of dangerous coastal processes of the reservoir: abrasion-latency, erosion activity. A method for monitoring erosion processes in water protection zones of water bodies using a software and hardware complex based on unmanned aerial vehicles and GIS technologies has been developed and tested. The optimal type of digital elevation models has been determined for assessing the density of the erosion network, determining the types of banks and the intensity of manifestation of abrasion and landslide processes, measuring the morphometric characteristics of erosional landforms. The types of erosional landforms were determined and the zoning of the territory of the water protection zone of the Tsimlyansk reservoir was carried out according to the density of the erosional dissection of the relief. Studies have shown that the predominant erosional forms of the relief of the water protection zone of the Tsimlyansk reservoir are ravines and gullies. The maximum average value of the density of the erosional network of the relief within the boundaries of the administrative districts of the reservoir coast falls on the Surowskiy district. In the Kalachevsky district, the maximum value of the density of the erosion network is noted within the water protection zone of the Tsimlyansk reservoir.

**Keywords:** dangerous coastal processes, density of the erosion network, orthophotomap, unmanned aerial vehicle, digital elevation model.

Согласно действующим нормативно-правовым актам, информация о значении густоты эрозионной сети водоохранной зоны (ВЗ) должна в обязательном порядке представляться органами, осуществляющими мониторинг водных объектов, для внесения в автоматизированную информационную систему государственного мониторинга [1].

Целью данного исследования являлись разработка и апробация методики комплексного мониторинга опасных береговых процессов (ОБП) с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и ГИС-технологий.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выделены типы берегов и интенсивность проявления абразионных и оползневых процессов Цимлянского водохранилища;
- определена густота эрозионной сети территории ВЗ побережья водохранилища;

– установлены типы эрозионных форм рельефа, проведено измерение морфометрических характеристик эрозионных форм рельефа;

– выполнено районирование территории ВЗ Цимлянского водохранилища по густоте эрозионного расчленения.

## Материалы и методы

Отработка методик осуществлялась на берегах Цимлянского водохранилища с применением БЛА Phantom 3 Advanced и Phantom 4 Pro. Обработка и анализ полученных материалов с БЛА выполнялись при помощи инструментария Agisoft Metashape и ArcGIS. Данные исследования позволяют определять тип берега, его морфологические и морфометрические характеристики (высота обрыва, уклон склона, ширина пляжа и др.), характер и направленность бе-

реговых процессов, дать анализ распространения эрозионных форм ВЗ водохранилища [2].

На основе серии фотоснимков, выполненных БЛА, по цифровым моделям рельефа (ЦМР) и ортофотопланам, созданным в программе Agisoft PhotoScan, определены типы эрозионных форм рельефа. Первым этапом работы являлось визуальное дешифрирование эрозионных форм рельефа исследуемой территории по фотоматериалам (маркировка всех тальвегов для дальнейших расчетов). В дальнейшем создавался слой площадей территорий для расчета густоты эрозионной сети. Проводилось измерение морфометрических характеристик эрозионных форм рельефа, была определена густота эрозионной сети ( $I$ ) побережья ВЗ Цимлянского водохранилища. Для выявления участков ВЗ водного объекта, различающихся по степени горизонтального расчленения, проводилось деление её территории на небольшие (элементарные) сегменты. Для каждого элементарного сегмента по разработанной авторами методике определялись площадь, длина тальвегов, расположенных в его границах эрозионных форм и рассчитывалась величина  $I: I=L/P$ , где  $L$  – длина эрозионной сети на площади  $P$ .

С помощью данной формулы вычислялась средняя густота эрозионного расчленения рельефа (ГЭР). Для этого определялась суммарная длина

тальвегов всех эрозионных форм, присутствующих на исследуемом участке, полученная сумма делилась на площадь данного участка,  $\text{км}^2$ . Данная методика была апробирована Российским информационно-аналитическим и научно-исследовательским водохозяйственным центром (ФГБУ РосИНВХЦ) в 2017–2018 гг. при изучении отдельных участков побережья Цимлянского водохранилища [3–5].

Всего в 2017–2019 гг. выполнено 992 полёта, в результате которых суммарная протяжённость обследованных участков ВЗ Цимлянского водохранилища составила более 700 км.

### Результаты исследования

Определение типов берегов и интенсивности проявления абразионных и оползневых процессов осуществляется на основе визуального анализа материалов фото- и видеосъёмки, выполненной с БЛА, в том числе панорамных фотоснимков, а также продуктов обработки фотоматериалов в Agisoft Metashape: ортофотопланов, отражающих вид ВЗ и берегов сверху, и проекций вида сбоку, построенных по материалам съёмки, выполненных камерой с наклонным или субгоризонтально ориентированным объективом (рис. 1).



Рис. 1. Пример различных материалов съёмки с БЛА для определения типа берега / Fig. 1. Example of different materials from PLA (pilot-less aircraft) surveys to determine a bank type

Для точного определения типовой принадлежности берега проводился анализ не только фотоматериалов, отражающих морфологию поверхности береговой зоны, но и данных по стратиграфии, литологии, гидрогеологии участка и другой информации [6].

В качестве основного материала для определения морфометрических характеристик субвертикальных береговых обрывов использовался ортофотоплан (вид сверху). На этих же ортофотопланах, вид сверху, отслеживались измерения линейных и площадных параметров береговых обрывов, используется последовательный ряд инструментов программы Agisoft Metashape (ломаная линия → измерить → плановые → профиль → полигон и др.). Примечательно, что полученные ортофотопланы могут быть проанализированы и в других ГИС-ориентированных программах, например ArcGIS.

Для определения высоты берегового обрыва, уклонов склона, ширины пляжа и морфологических особенностей берега на ортофотоплане строились поперечные профили (рис. 2). Сопоставление и ана-

лиз полученных разновременных съемок на данном участке берега позволили оценить интенсивность проявления ОБП.

Для примера был взят показательный профиль на участке с проявлением активных абразионных процессов. На основе четырех серий измерений установлено, что скорость абразии составляет в среднем 2,5 м/год (рис. 3).

Для получения информации о продвижении береговой линии в плане проводились сравнения ортофотопланов береговой зоны водохранилища, которые были построены по сериям снимков, полученных в различные временные интервалы [7].

Визуальное сопоставление разновременных ортофотопланов не всегда позволяет выявить все изменения положения бровки берегового уступа, тем более произвести их количественную оценку. Поэтому для выявления произошедших изменений положения береговой линии осуществлялось относительное взаимное позиционирование ортофотопланов, при выполнении которого ортофотопланы привязывали друг к другу по опорным точкам.



Рис. 2. Пример фрагмента разновременных ортофотопланов с поперечным профилем абразионного берега / Fig. 2. A fragment example of orthophotomaps taking maps place at different times with diametrical profiles of the abrasion bank

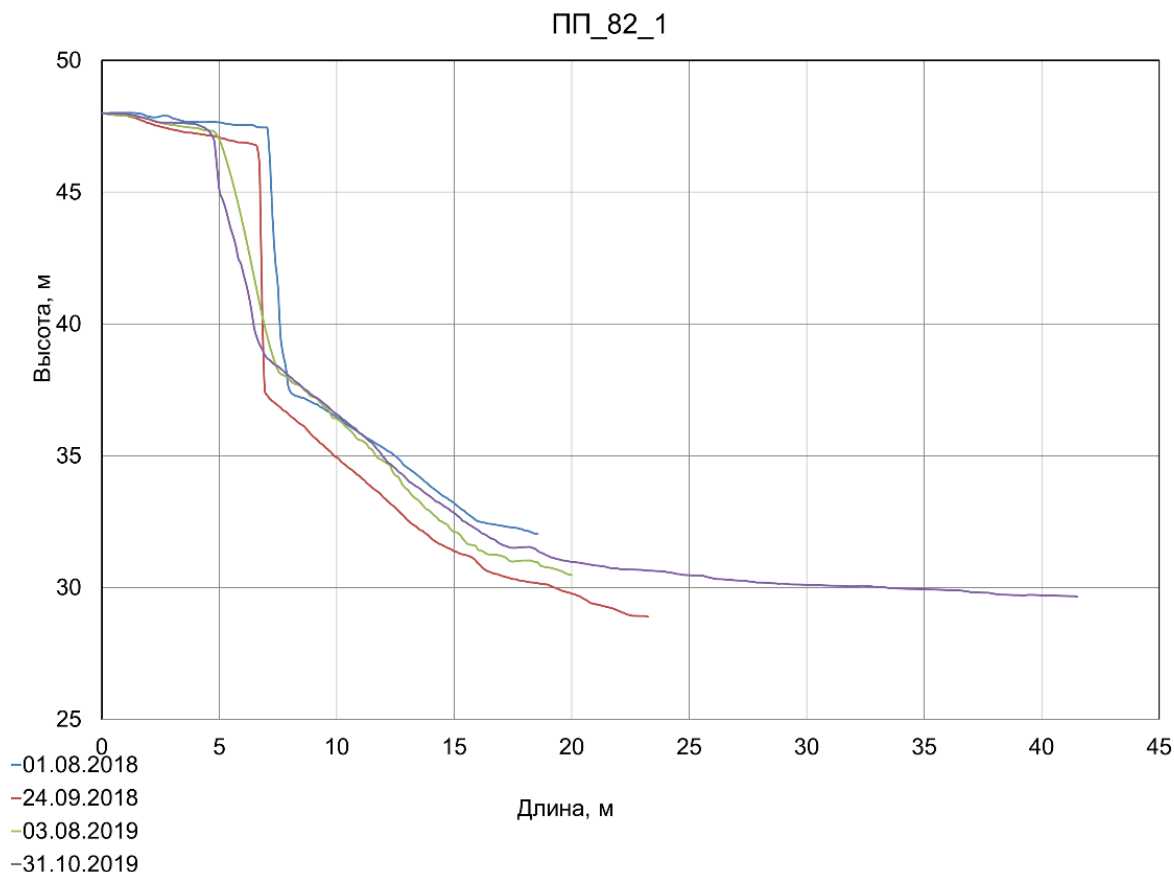


Рис. 3. Примеры сопоставления поперечных профилей, полученных при помощи Agisoft PhotoScan  
/ Fig. 3. Examples of comparison of diametrical profiles received by the help of Agisoft PhotoScan

Для сравнения привязанных данным способом ортофотопланов в ПО ArcMap использовали следующие приёмы:

- мерцающие снимки (flicker) – поочерёдное отображение на экране дисплея совмещённых по реперным точкам разновременных ортофотопланов;

- метод сдвига (swipe) – изображение на одном ортофотоплане смещается относительно изображения на ортофотоплане, снятого с временным интервалом;

- маркировка бровки уступа – выполняется оцифровка бровки уступа на двух ортофотопланах, после чего положение линии бровки (с указанием даты проведения съёмки) сравнивают, используя один из ортофотопланов в качестве подложки или без неё (рис. 4). Последний метод позволяет не только визуализировать произошедшие изменения положения бровки берегового уступа, но и выполнить различные измерения (величина смещения (расстояние), площадь разрушенных земель и объём обвалившегося грунта).

Подобные съёмки позволяют наглядно оценить интенсивность продвижения береговой линии в

плане и интенсивность ОБП на значительной территории.

Отработка методики мониторинга с БЛА за оползневыми процессами выполнялась в районе х. Алдабульского в течение 2017–2018 гг. Объект исследования – крупный блоковый оползень в активном состоянии. Анализ ортофотопланов и поперечных профилей оползневого тела показал, что первоначально происходило увеличение протяжённости оползневой зоны вдоль границы берегового уступа. За первые два месяца наблюдения длина берега, вовлечённого в оползневой процесс, увеличилась со 100 до 165 м (рис. 5). Затем движение в этом направлении прекратилось. Но вертикальные смещения оползня (оседание) продолжались и даже активизировались, что подтверждается сравнением поперечных профилей (рис. 5).

Помимо визуализации процессов деградации оползневого склона данная программа (метод) позволяет измерить ряд морфометрических характеристик оползня (высота стенки отрыва, количество ступеней и др.), а также определить площадь и объём оползневого тела.

Овражная (линейная эрозия) – сложный рельефообразующий процесс формирования и развития отрицательных форм рельефа под действием временных русловых потоков. При этом основными формами являются овраги, отличающиеся многообразием морфометрических и морфологических характеристик. Помимо оврагов широкое развитие получили эрозионные борозды (рытвины) и промоины, которые в эволюционной схеме формирования оврагов обычно рассматриваются как промежуточные, однако являются неотъемлемой частью эрозионных процессов. Комбинации эрозионных форм на исследуемой территории имеют определенные отличия от участка к участку, обусловлено это слагающими породами, наличием растительности, особенностью водных потоков: так, на одной территории основной формой может выступать овраг, на другой – множественные рытвины и борозды.

Внутри каждой ячейки по морфологическим особенностям рельефа были выделены следующие типы эрозионных форм и рассчитана протяженность их тальвегов:

- реки и ручьи (L1);
- борозды и рытвины (L2);
- овраги и балки (L3).

По протяженности эрозионные формы рельефа были выделены в отдельную в пределах ВЗ водохранилища (в пределах ВЗ (L4), и рассчитывалась протяженность тальвегов выделенных эрозионных форм, которые выходили за границы ВЗ (ВЗ (L5)). Протяженности тальвегов каждого типа эрозионных форм рельефа суммировались (таблица).

По результатам проведенных работ сделано районирование территории ВЗ Цимлянского водохранилища по густоте эрозионного расчленения рельефа. Для детального анализа густоты эрозионной сети ВЗ Цимлянского водохранилища в соответствии с методикой, изложенной выше, была разбита на ячейки длиной 1 км. Выделение ячеек осуществлялось в пределах каждого района.

ВЗ Цимлянского водохранилища, согласно разбивке диапазона значений  $I$  на 16 классов, окрашена от темно-зеленого до желтого цвета. Густота эрозионной сети ВЗ Цимлянского водохранилища изменялась от 0 до 30 км/км<sup>2</sup> (рис. 6).

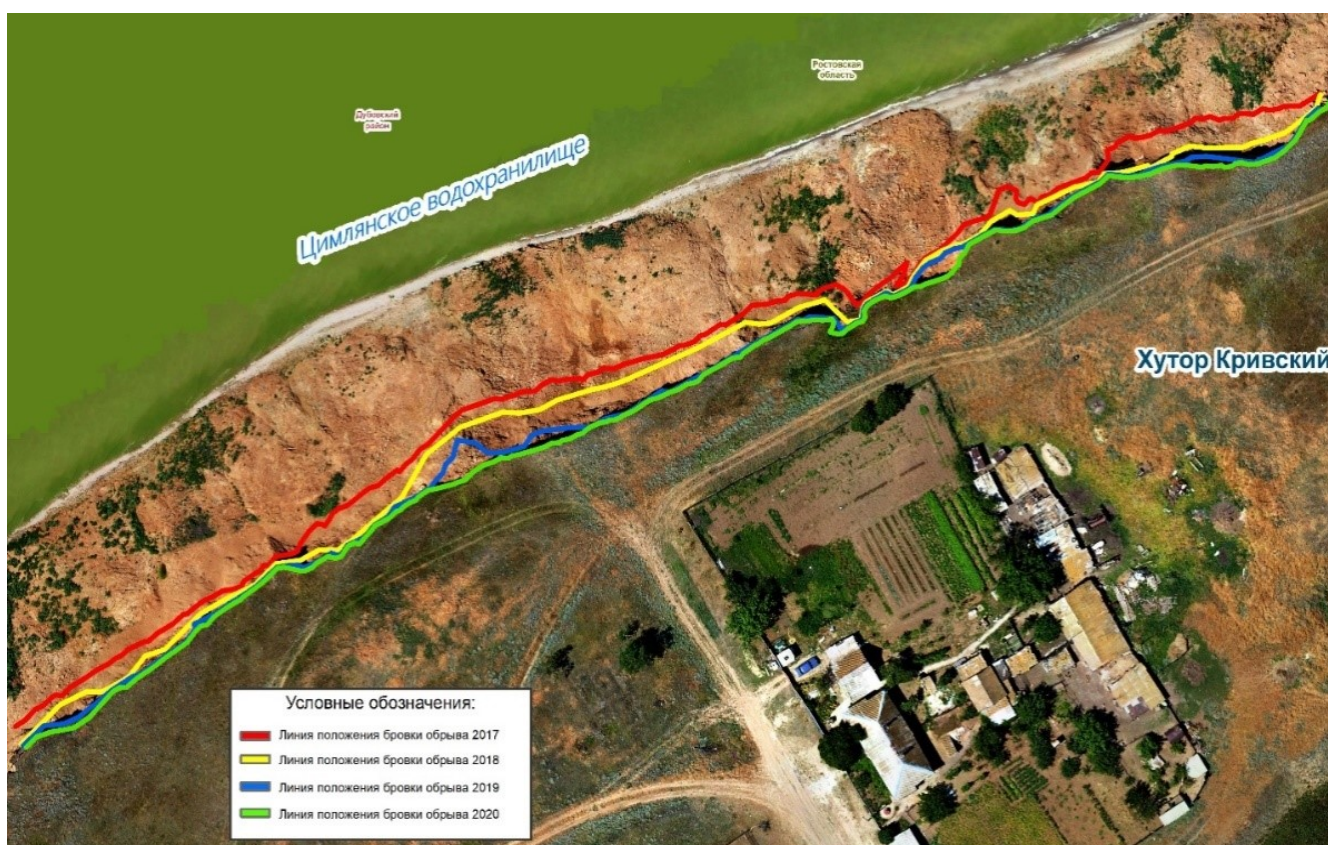


Рис. 4. Изменение положения бровки берегового обрыва на восточной окраине х. Кривского за разные периоды наблюдений / Fig. 4. Changing of the edge location of the bank precipice on the eastern outskirts of Krivsky Khutor in different observation periods

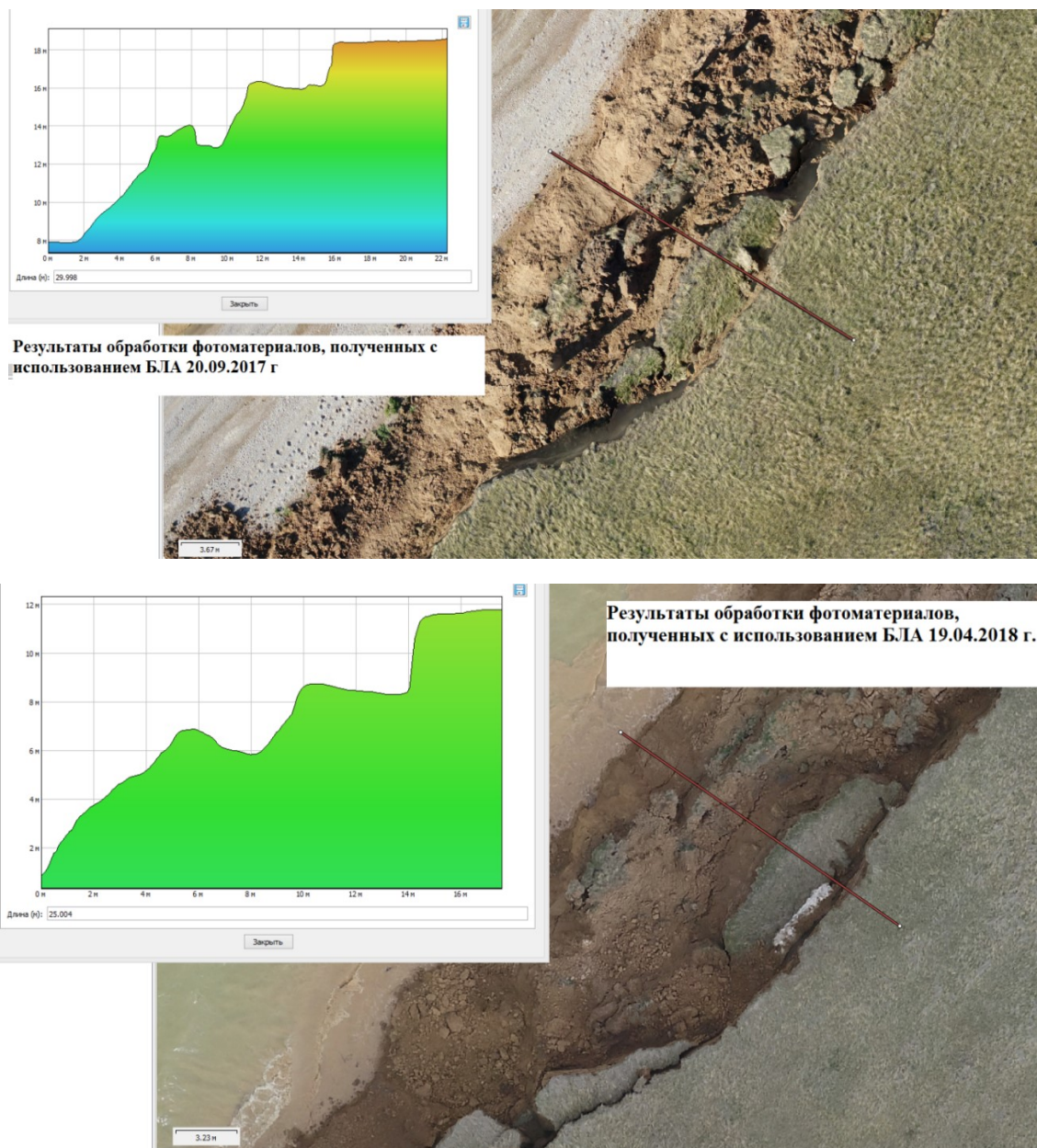


Рис. 5. Изменение амплитуды вертикального смещения верхней плоскости блокового оползня в районе х. Алдабульского с 2,2 (20.09.2017) до 3 м (19.04.2018) / Fig. 5. Changing of vertical displacement amplitude for the upper plane of the side landslide in the region of the Aldabulsky khutor from 2.2 on September 20, 2017 by 3 m on April 19, 2018

**Основные характеристики эрозивных форм рельефа территории ВЗ Цимлянского водохранилища / Principal characteristics of the relief erosion forms for the territory of the Tsimlyansk reservoir water protection zone**

Район	Площадь Р, км <sup>2</sup>	Реки и ручьи L1, км	Борозды и рытвины L2, км	Овраги и балки L3, км	В пределах ВЗ L4, км	Выходит за границу ВЗ L5, км	Сумма тальвегов L, км	ГЭР I
Дубовский	17,82	3,05	14,52	124,85	94,43	48,96	142,42	7,99
Октябрьский	17,36	2,77	11,20	33,48	18,08	29,39	47,45	2,73
Суровикинский	31,98	5,04	24,78	189,70	103,57	114,00	541,52	16,93
Цимлянский	52,98	3,68	11,83	143,03	100,27	58,10	158,53	3,11
Котельниковский*	15,24	0	10,36	83,29	64,78	26,36	93,66	6,15
Калачёвский*	38,65	5,12	50,94	168,95	143,19	82,47	225,01	5,82
Чернышковский*	13,25	2,16	7,63	27,70	20,40	17,36	37,49	2,83

\* отснята не вся территория ВЗ.

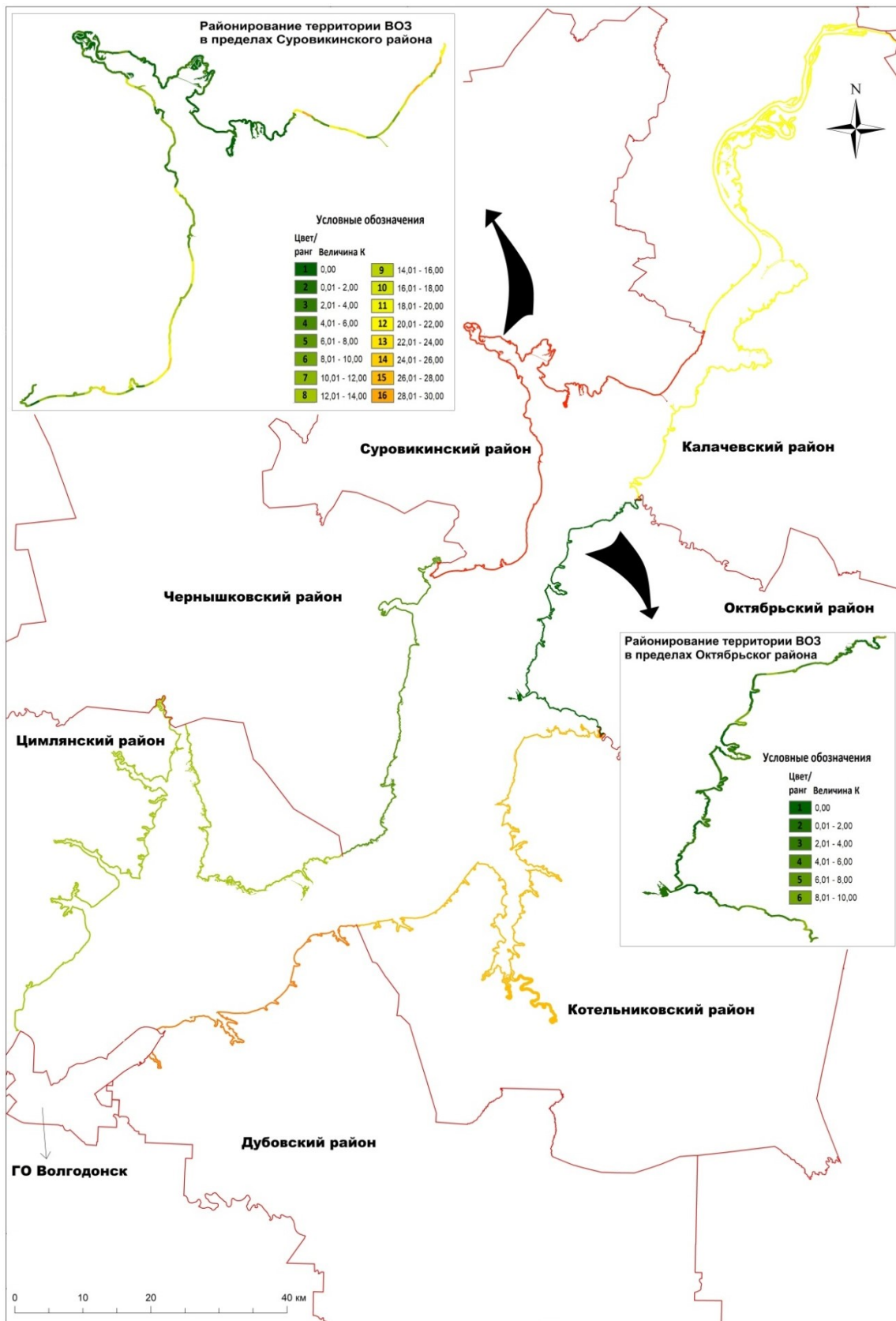


Рис. 6. Районирование территории ВЗ Цимлянского водохранилища по густоте эрозионного расчленения / Fig. 6. Division into districts of the territory for the Tsimlyansk reservoir water protection zone by the density of erosion dismemberment

Проведенные исследования показали, что преобладающими эрозионными формами рельефа ВЗ Цимлянского водохранилища являются овраги и балки. Большинство выделенных эрозионных форм находятся в основном в пределах ВЗ водохранилища (таблица, рис. 6). Максимальное среднее значение густоты эрозионной расчлененности рельефа в границах административных районов приходится на Суровикинский район, где овраги и балки получили самое широкое распространение. Однако данные густоты эрозионной расчлененности рельефа в границах административных районов сильно усреднены, например, на территории ВЗ Суровикинского района присутствуют отрезки побережья, имеющие значение ГЭР как равные нулю, так и с довольно высоким значением ГЭР – 28,2. Октябрьский район, что хорошо видно на врезке рис. 6, имеет, напротив, значения густоты эрозионной сети достаточно однородные и самые низкие в пределах побережья значения ГЭР – 2,7. Калачёвский район по среднему значению показателя ГЭР занимает промежуточное положение среди всех административных районов – 5,82, однако именно в этом районе на небольшом отрезке побережья отмечается максимальное значение (40,87) густоты эрозионной сети в пределах ВЗ Цимлянского водохранилища (рис. 6).

Одной из важных задач геоэкологического мониторинга является наблюдение за проявлением экзогенных геологических процессов на берегах водохранилищ. Особенно это актуально на берегах с отсутствием регулярной наблюдательной реперной сети, с низкой транспортной доступностью. Отсутствие данных о проявлении экзогенных геологических процессов в ВЗ берегов водохранилищ не позволяет объективно оценить интенсивность проявления этих процессов, последствия для состояния экосистемы водохранилища, затрудняет составление обоснованного плана мероприятий по предупреждению негативных последствий. Действующий порядок осуществления наблюдений не позволяет получать оперативную информацию в экстремальных ситуациях на участках, не обеспеченных створами наблюдений. Использование БЛА в настоящее время является перспективным методом мониторинга ВЗ водных объектов.

#### Литература

1. Об утверждении форм и порядка представления сведений, полученных в результате наблюдений за водными объектами, заинтересованными федеральными органами исполнительной власти, собственниками водных объектов и водопользователями : приказ МПР РФ от 6 февраля 2008 г. № 30 // Справочно-правовая система «Консультант плюс».

2. Косолапов А.Е., Скрипка Г.И., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Филатов А.А. Исследование морфологических и морфометрических особенностей берегов Цимлянского водохранилища с использованием беспилотных летательных аппаратов и ГИС-технологий // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24, № 3(24). С. 36–42.

3. Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Сердюк Л.В. Оценка густоты эрозионной сети водоохранной зоны Цимлянского водохранилища с использованием современных информационных технологий и беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в целях совершенствования методов государственного мониторинга // Водохранилища Российской Федерации: современные экологические проблемы, состояние, управление : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Новочеркасск: Лик, 2019. С. 288–295.

4. Ивлиева О.В., Скрипка Г.И., Беспалова Л.А., Калиманов Т.А., Чмыхов А.А. Мониторинг опасных экзогенных геологических процессов водоохранной зоны Цимлянского водохранилища с использованием беспилотных летательных аппаратов // Водные ресурсы России: современное состояние и управление : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф., 8–14 октября: в 2 т. Новочеркасск: Лик, 2018. Т. I. С. 313–317.

5. Скрипка Г.И., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Сердюк Л.В., Калиманов Т.А. Мониторинг эрозионных процессов водоохранной зоны Цимлянского водохранилища с помощью программно-аппаратного комплекса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 3. С. 64–78.

6. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan: Professional Edition. URL: [http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_ru.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf) (дата обращения: 10.03.2017).

7. Никифоров А.А. Обработка материалов аэрофотосъёмки, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата // Информационные системы и технологии: теория и практика : сб. науч. тр. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. № 9. С. 194–197.

#### References

1. On approval of forms and order for presenting the information received as results of observations on water bodies by the concerned federal agencies of the executive power, water body owners and water users. Order of the RF Ministry of Natural Resources of February 6, 2008 No. 30. *Legal reference system "Consultant Plus"*. (in Russian).

2. Kosolapov A.E., Skripka G.I., Bepalova L.A., Ivlieva O.V., Filatov A.A. (2018). Research into morphological and morphometrical peculiarities of the Tsimlyansk reservoir banks using pilotless aircraft and GIS-technologies. *Aridnye ekosistemy*, vol. 24, No. 3 (76), pp. 36-42. (in Russian).

3. Ivlieva O.V., Bepalova L.A., Serdyuk L.V. (2019). Assessment of erosion network density for the Tsimlyansk reservoir water protection zone using modern information technologies and pilotless aircrafts (PLA) to improve state

monitoring methods. *The Russian Federation water reservoirs: up-to-date ecological problems, state, management*. All-Russian Scientific and Practical Conference. Novochechensk, Lik Publ., pp. 288-295. (in Russian).

4. Ivlieva O. V., Skripka G. I., Bespalova L. A., Kalimanov T. A., Chmikhov A. A. (2018). Monitoring of dangerous exogenetic geological processes of the Tsimlyansk reservoir water protection zone using pilotless aircrafts. *Water resources of Russia: modern state and management*. Proceedings of All-Russian scientific and practical conference, Sochi, October 8-14, 2018. In 2 vol. Novochechensk, Lik Publ., vol. 1, pp. 313-317. (in Russian).

5. Skripka G.I., Ivlieva O.V., Bespalova L.A., Serdyuk L.V., Kalimanov T.A. (2019). Monitoring of erosion

processes in the Tsimlyansk reservoir water protection zone by the help of software and hardware complex. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 3, pp. 64-78. (in Russian).

6. *Agisoft PhotoScan users manual*. Professional edition. Available at: [http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_ru.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf) (accessed March 10, 2017). (in Russian).

7. Nikiforov A.A. (2017). Processing aerial survey materials received by the help of a pilotless aircraft. *Information systems and technologies: theory and practice*. Saint Petersburg, Saint Petersburg State Forest Technological University Press, No. 9, pp. 194-197. (in Russian).

---

*Поступила в редакцию / Received*

*4 февраля 2021 г. / February 4, 2021*

УДК 553.875+553.499 (470.61)

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-66-72

## МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ ЖИЛ С КВАРЦЕМ ТИПА «ДИАМАНТЫ ДОНБАССА» СЕЛЕЗНЕВСКОГО УГЛЕНОСНОГО РАЙОНА (СКЛАДЧАТЫЙ ДОНБАСС)

© 2021 г. О.С. Крисак<sup>1</sup>, Ю.В. Попов<sup>2</sup><sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина,<sup>2</sup>Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

## MINERAL ASSOCIATIONS OF VEINS WITH QUARTZ OF THE "DIAMONDS OF DONBASS" TYPE IN THE SELEZNEVSKY COAL-BEARING DISTRICT (FOLDED DONBASS)

O.S. Krisak<sup>1</sup>, Yu.V. Popov<sup>2</sup><sup>1</sup>Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine,<sup>2</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Крисак Олег Сергеевич – старший преподаватель, кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых, Донецкий национальный технический университет, ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина, e-mail: krisakoleg@gmail.com

Oleg S. Krisak - Senior Lecturer, Department of Geology and Exploration of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University, Artema St., 58, Donetsk, 83001, Ukraine, e-mail: krisakoleg@gmail.com

Попов Юрий Витальевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра месторождений полезных ископаемых, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: popov@sfedu.ru

Yuri V. Popov - Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: popov@sfedu.ru

В пределах Селезневского угленосного района складчатого Донбасса авторами установлены кварцевые и кварц-карбонатные жилы, образование которых связано с низкотемпературной гидротермальной системой метаново-водного состава. Рассмотрены закономерности локализации гидротермальной минерализации, содержащей кварц с включениями углеводородов, и её потенциальная рудоносность. Установлено, что жильные тела локализованы главным образом в присводовой части брахиантиклиналей третьего порядка в центральной и краевых частях Селезневской синклинали. Жилы образуют системы, связанные с трещиноватостью межпластового расщепления или пересекающие пласты по нормали. Межпластовые жилы подразделены на плитообразные массивные и жильные тела с друзовой текстурой. В составе жил второго типа присутствуют кристаллы кварца с углеводородными включениями, относимые к «диамантам Донбасса». Они образуют парагенетическую ассоциацию с диккитом. Помимо этого, в жильных телах среди пластов известняков типичным ассоциирующим минералом является кальцит в форме короткопризматических кристаллов. В жилах среди пластов песчаников развита ассоциация с гетитом, окислами и гидроокислами марганца. На основании шлихового опробования в жильных телах установлена киноварь двух морфологических типов, наибольшее количество которой приурочено к брахиантиклиналям краевых частей Селезневской синклинали. Анализ результатов указывает на перспективы выявления ртутной минерализации с кварц-диккит-киноварным типом оруденения.

**Ключевые слова:** метаново-водные гидротермы, «диаманты Донбасса», «мармарошские диаманты», диккит, киноварь.

The authors have established quartz and quartz-carbonate veins, the formation of which is associated with a low-temperature hydrothermal system of methane-water composition within the Seleznevsky coal-bearing region of the Folded Donbass. The article considers the features of localization of hydrothermal mineralization containing quartz with inclusions of hydrocarbons, and its potential ore content. It is established that the vein bodies are localized mainly in the near-hinge parts of the third-

order brachianticlines in the central and marginal parts of the Seleznevskaya syncline. These veins form systems associated with the fracturing of the inter-layer stratification or intersecting the layers. Interplastic veins are subdivided into plate-like massive and vein-like bodies with a druze texture. The veins of the second type contain quartz crystals with hydrocarbon inclusions, referred to as "diamonds of Donbass". They form a paragenetic association with dickite. In addition, calcite in the form of short-prismatic crystals is a typical associated mineral in the vein bodies among limestone strata. In the veins among the sandstone layers, the association with goethite, oxides and hydroxides of manganese is developed. Two morphological types of cinnabar were found in the vein bodies on the basis of HMS sampling, the largest number is confined to the brachianticlines of the marginal parts of the Seleznevskaya syncline. The analysis of the results indicates the prospects for identifying mercury mineralization with quartz-dickite-cinnabar type of mineralization.

**Keywords:** methane-water hydrotherms, "diamonds of Donbass", "Marmarosh diamonds", dickite, cinnabar.

## Введение

В складчатом Донбассе гидротермальное оруденение в региональном плане связано с Центральнo-Донецким глубинным разломом и контролируется узлами его пересечения с поперечными региональными нарушениями. В зоне Центральнo-Донецкого разлома вдоль сводовой части Главной антиклинали расположены все известные рудные месторождения Никитовского и Нагольного рудных полей, Дружковско-Константиновской антиклинали и Бантышевского купола [1]. Вдоль этих структур с запада на восток наблюдается смена зон рудной минерализации от ртутной (киноварь) и сурьмяно-ртутной (антимонит, киноварь) до золотополиметаллической (галенит, сфалерит). Рудоносные жилы обязаны своим происхождением гидротермальным флюидам, сходным по составу, но отличающимся насыщенностью легколетучими веществами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ). Значительно обогащены  $\text{CO}_2$  флюиды наиболее крупных месторождений и проявлений Нагольного кряжа, меньшей насыщенностью характеризуются флюиды мелких рудных проявлений и хрусталеносные жилы Нагольного кряжа, сравнительно мало насыщены  $\text{CO}_2$  углекислотно-водные растворы, формирующие оруденение Никитовского рудного поля [2].

Менее изучены закономерности распространения гидротермальной минерализации за пределами Главной антиклинали. Наряду с широким развитием гидротермальных процессов с участием углекислоты (Нагольный кряж) в Центральном Донбассе, особенно в его окраинных участках, проявлена деятельность низкотемпературных метаново-водных гидротерм, сформировавших кварц-кальцитовые и кварцевые жилы, минералы которых включают включения углеводородного, существенно метанового, состава. Согласно схеме зональности жильных гидротермальных проявлений в породах карбона рассматриваемой территории эти жилы относятся к поздней (III) группе, которая считается неперспективной на наличие рудной минерализации [3, 4]. Однако кварц-диккит-киноварные проявления наблюдаются в аналогичных отложениях Амвросиевского

купола [1], Донецко-Макеевского угленосного района [5] и в Гуковской флектуре в Восточном Донбассе [6]. В большинстве случаев отмеченные выше участки кинoварной минерализации совпадают с площадями повышенного содержания ртути в углях [7] и распространения кварца с углеводородными включениями [8]. Помимо этого, в зоне Центральнo-Донецкого разлома на Константиновском и Славянском месторождениях [9, 10] кварц-диккит-киноварные руды входят в ассоциацию с битуминозной минерализацией, а на Никитовском рудном поле кварц с углеводородными включениями относится к наиболее поздним жильным образованиям [11, 12].

Таким образом, требуют специального рассмотрения закономерности локализации кварцевых и карбонатно-кварцевых жил, связанных с низкотемпературными гидротермальными системами метаново-водного состава, и установление их связи с рудной минерализацией. По данным И.Н. Зинчука [13], прослеживается четкая связь местонахождения жил с метановыми включениями с зонами распространения угля умеренной степени метаморфизма (угли от длиннопламенных к тощим) и площадями установленной или перспективной газоносности пород карбона. К числу площадей с такой закономерностью принадлежат и Селезневский угленосный район.

## Геологическое строение Селезневского угленосного района

В геологическом строении Селезневского угленосного района принимают участие угленосные породы каменноугольной системы (свиты  $\text{C}_2^2$ – $\text{C}_3^1$ ), перекрытые маломощным чехлом четвертичных отложений. В геолого-структурном отношении район относится к области западного замыкания Северной, или Колпаковско-Замчаловской, антиклинали – одного из основных структурных элементов Донецкого бассейна. Наиболее крупные складчатые структуры второго порядка района – Чернухинская антиклиналь и Селезневская синклиналь, осложненные рядом дополнительных складок высшего порядка (рис. 1).

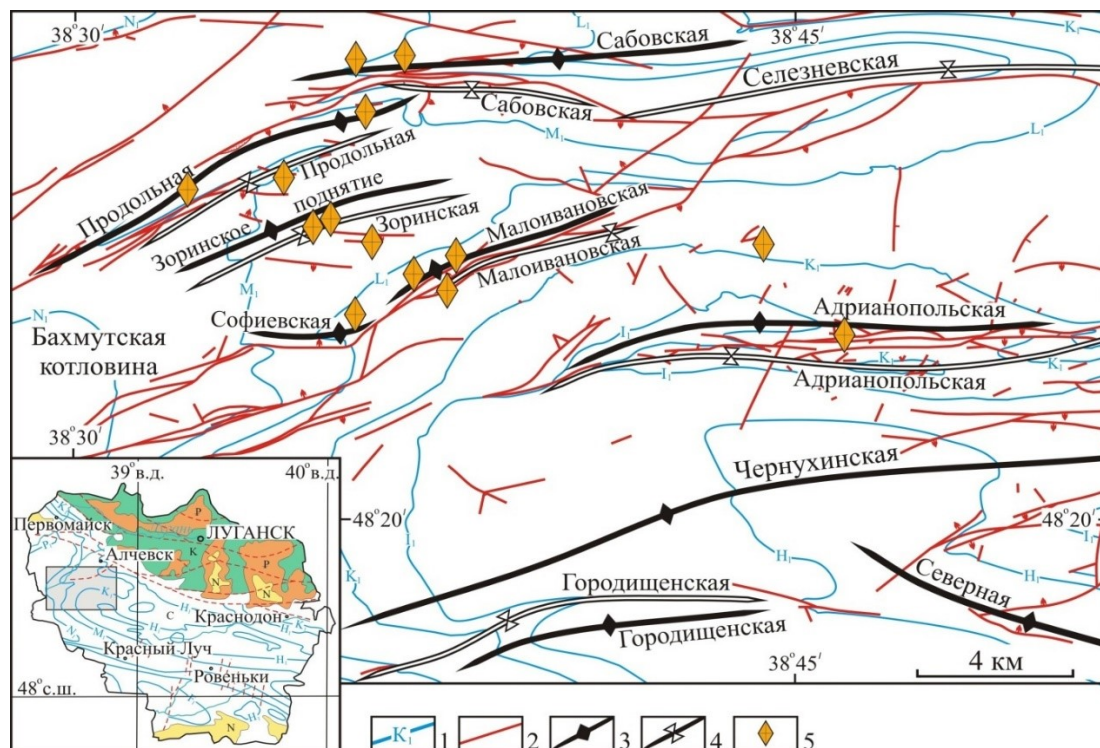


Рис. 1. Структурная карта Селезневского угленосного района: 1 – маркирующие горизонты; 2 – разрывные нарушения; 3 – ось антиклинальных складок; 4 – ось синклинальных складок; 5 – участки проявления кварца типа «диаманты Донбасса» / Fig. 1. Structural map of Seleznevsk coal-bearing district: 1 - marker horizons; 2 - faults; 3 - axis of anticlinal folds; 4 - axis of synclinal folds; 5 - areas of "diamonds of Donbass" style quartz occurrences

Крупные разрывные нарушения представлены надвигами северо-восточного и субширотного простирания; первые наиболее развиты в пределах краевых частей Селезневской синклинали, вторые приурочены главным образом к брахиантиклиналям, усложняющим северное крыло Чернухинской антиклинали. Для брахискладок центральной и краевых частей Селезневской синклинали характерны мелкоамплитудные чешуйчатые надвиги, по сместителям которых породы деформированы во «взбросо-складки».

Структурный ансамбль включает субширотные складки продольного изгиба и систему сопровождающих их продольных встречно-падающих надвигов и в целом отвечает взбросовому полю напряжений [14], являющемуся самым молодым (соответствует ларамийской фазе альпийского тектоногенеза) для Донецкого бассейна [15, 16].

### Морфология жильных тел

Жилы образуют системы, связанные с трещиноватостью межпластового расслоения или пересекающие пласты по нормали. В пределах Селезневского угленосного района кристаллы кварца с углеводород-

ными включениями установлены только в межпластовых жильных телах, приуроченных к песчаникам и известнякам. По ориентировке и морфологическим особенностям такие жильные тела подразделяются на два типа: межпластовые плитообразные массивные жилы и межпластовые жильные тела с друзовой текстурой. Оба типа наиболее проявлены в присводовых частях брахиантиклиналей третьего порядка в пределах краевых частей Селезневской синклинали (рис. 1). И только одна межпластовая жила с друзовой текстурой была установлена на южном крыле Адрианопольской синклинали, усложняющей северное крыло Чернухинской антиклинали.

Межпластовые плитообразные жилы мощностью от 1–2 до 25 см (в среднем 8 см), довольно выдержанные по простиранию, прослежены на расстоянии до 5–7 м. Контакты жил с вмещающей породой в основном четкие и ровные. На зальбандах часто встречаются штрихи скольжения. Изредка в жилах встречаются остаточные полости шириной от 1–2 до 12 см.

Межпластовые жилы с друзовой текстурой имеют клиновидную и линзообразную форму. По простиранию жильные тела довольно выдержанные, прослеживаются на расстоянии от 0,5–1 до 3 м; по падению крайне невыдержанные, резко выклиниваются и пе-

реходят в тонкие прожилки. В жильных телах раздувы имеют изометрически неправильную и эллипсоидную форму, вытянутую вдоль простирания. Контакты с вмещающей породой четкие, слегка неровные, приконтактовые изменения не наблюдаются.

Среди межпластовых жил с друзовой текстурой в пределах брахискладок третьего порядка Селезневской синклинали присутствуют кристаллы прозрачного горного хрусталя или дымчатого кварца дипирамидального облика с блестящими гранями, относимые к «диамантам Донбасса»<sup>1</sup> (в целом сходными с «мармарошскими диамантами» Карпат [17]). В крепком грубослоистом известняке K<sub>7</sub> и грубослоистых пачках известняка L<sub>7</sub> жилы с «диамантами Донбасса» приурочены к локальным областям складок срыва и к зонам ундулирования пластов в пределах «взбросо-складок» краевых частей Селезневской синклинали; в глинистой тонкоплитчатой пачке известняка L<sub>7</sub> – к складкам волочения в пределах «взбросо-складок» на Сабовской брахиантиклинали. Также жилы наблюдаются и на Продольной брахиантиклинали и Зоринском антиклинальном поднятии, где они контролируются ститолитовыми текстурами субширотного простирания. Жильные тела, невыдержанные по падению и простиранию, сопровождаются открытыми полостями.

Во всех структурно-морфологических типах жильных тел Селезневской синклинали «диаманты Донбасса» относятся к одним из наиболее поздних генераций.

### Парагенетические ассоциации минералов с кварцем типа «диаманты Донбасса»

В межпластовых жилах пластов песчаников и известняков кварц типа «диаманты Донбасса» в пределах брахискладок третьего порядка Селезневской синклинали находится в тесной ассоциации с диккитом, который заполняет свободное пространство полостей. В сплошных массах диккит перламутрового блеска белого цвета, местами с желтоватым оттенком. Отдельные кристаллы представлены прозрачными удлинёнными или шестиугольными пластинками размером до 0,1 мм. Ещё одним типичным ассоциирующим минералом является кальцит в форме короткопризматических кристаллов с преобладающим развитием граней ромбоэдров  $\{01\bar{1}2\}$  и слабо развитыми гранями призмы  $\{10\bar{1}0\}$ . Кальцит нарастает на кристаллы кварца с углеводородными включениями. В присводовой части брахиантиклиналей

третьего порядка в краевых частях Селезневской синклинали в жильных телах пластов песчаников распространены окислы и гидроокислы марганца, образующие натечные и дендритообразные выделения на поверхности кристаллов кварца. Дендритообразные выделения (размером от 0,1 до 5 мм) нередко ассоциируют с диккитом. Жильные полости частично заполнены глиной ярко-оранжевого цвета с обломками щеток кварца и двухголовыми кристаллами дымчатого кварца свободного роста, иногда со скоплениями гетита, почковидных агрегатов окислов и гидроокислов марганца (иногда в сростаниях с витеритом). Судя по составу гипергенных минералов, образование глины связано с окислением первичных (гипогенных) минералов жильных тел. Подобное глинистое заполнение полостей жил широко проявлено во многих районах складчатого Донбасса [18].

В шлихах из проточек материала глинистого заполнения жильных тел с друзовой текстурой в пластах песчаника, отобранных в пределах центральной части Малоивановской брахиантиклинали и южного крыла Сабовской брахиантиклинали, установлено присутствие киновари (знаки в исходных пробах массой 12 кг), относящийся к двум морфологическим типам. Первый тип, наиболее распространенный, представлен относительно крупными (0,5–0,7 мм) зернами изометрической или округлой формы (рис. 2а), а также угловатыми обломками. Зерна полупрозрачные бледно-красного и красного цвета, значительно реже – насыщенно тёмно-красного цвета. В шлиховой пробе кристаллы киновари тёмно-красного цвета обладают ромбоэдрическим габитусом (рис. 2б), образуют сростания с диккитом желтовато-белого цвета. Второй тип представлен зернами вытянутой формы (рис. 2в) призматического габитуса с округленными гранями. Кристаллы киновари характеризуются мелкими размерами (0,25–0,5 мм), тёмно-красным и насыщенно-рубиновым цветом, реже наблюдается бледно-красная и розовая окраска. Сростаний киновари второго типа с другими минералами не наблюдается.

В ассоциации с киноварью в протолочках встречаются (в количестве более 100 знаков) псиломелан, гетит, апатит. Псиломелан представлен зернами округлой формы размером 0,4–0,5 мм, крайне редко образующими сростания с желтовато-белым диккитом (рис. 2г). Гетит в протолочке находится в основном в виде округлых зерен, реже в виде псевдоморфоз по кристаллам гематита (рис. 2д). Апатит представлен хорошо сохранившимися кристаллами длиннопризматического габитуса

<sup>1</sup> В связи с тем, что за кварцем с углеводородными включениями закрепились местные названия, в 2009 г. Э. Юдовичем применительно к подобным донбасским кварцам использован термин «донецкие диаманты». В 2020 г. О.С. Крисаком в ряде публикаций данная разновидность кварца описана как «диаманты Донбасса».

(рис. 2е) размером до 0,5–1 мм, прозрачными и бесцветными, реже имеющими желтоватый и красноватый оттенок.

В пределах центральной части Селезневской синклинали киноварь в протолочках установлена только в пределах северного крыла Зоринского антиклинального поднятия. Проба была отобрана из сильно выветренной межпластовой жилы с остаточными полостями в глинистой тонкоплитчатой пачке известняка L<sub>7</sub>. Материал для промывки представлял собой ярко-оранжевую глину с обломками кристаллов

кальцита и горного хрусталя. В протолочке установлено незначительное количество киновари (до 10 знаков) в виде резко угловатых зерен изометрической или вытянутой формы (рис. 3а) размером от 0,2 до 0,4 мм. Единичные зерна киновари находятся в сростках с желтовато-белым диккитом. В значительном количестве (более 100 знаков) в пробе установлены кубические кристаллы пирита (от 0,2 до 1 мм), покрытые коркой лимонита (рис. 3б), покрытые коркой лимонита (рис. 3б). Присутствующие зерна гетита имеют неправильную форму (рис. 3в); обычно находятся в сростании с диккитом.

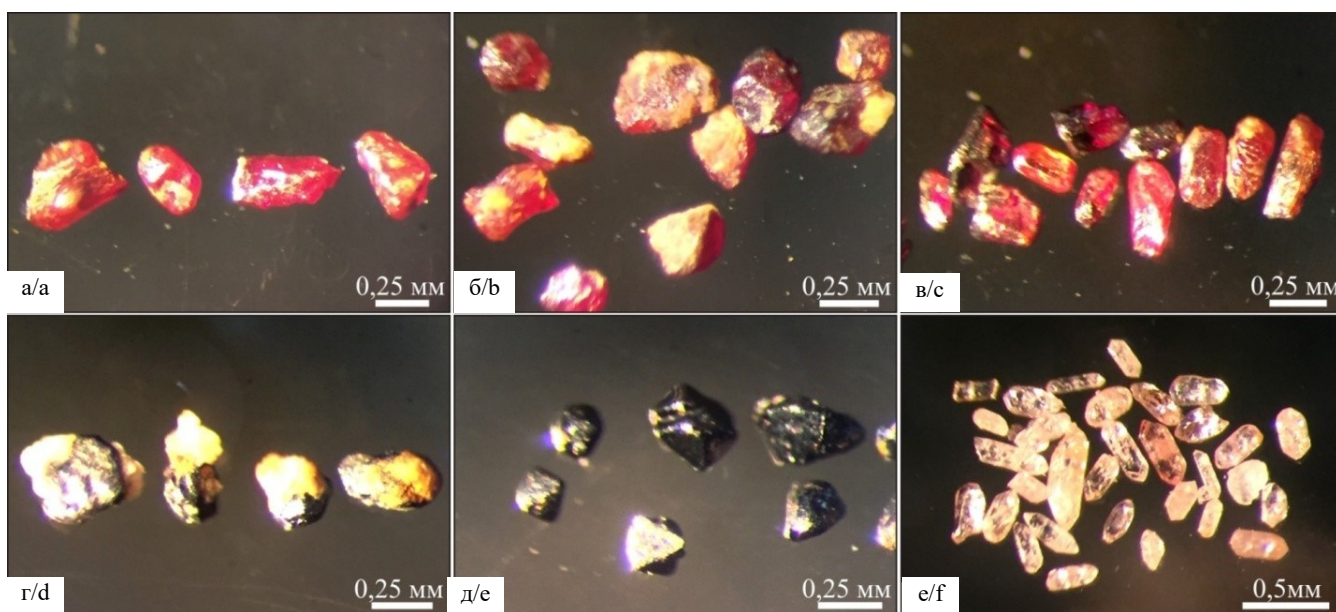


Рис. 2. Рудные минералы протоочки межпластовых жил с друзовой текстурой в пласте песчаника: а – бледно-красные зерна киновари; б – киноварь в сростках с диккитом; в – призматические кристаллы киновари; г – псиломелан в сростках с диккитом; д – псевдоморфозы гетита по гематиту; е – длиннопризматические кристаллы апатита / Fig. 2. Ore minerals of interlayer vein with druze texture in sandstone (crushed sample): a - pale red grains of cinnabar; b - cinnabar in clusters with dickite; c - prismatic crystals of cinnabar; d - psilomelane in clusters with dickite, e - pseudomorphs of goethite to hematite; f - long-prismatic crystals of apatite

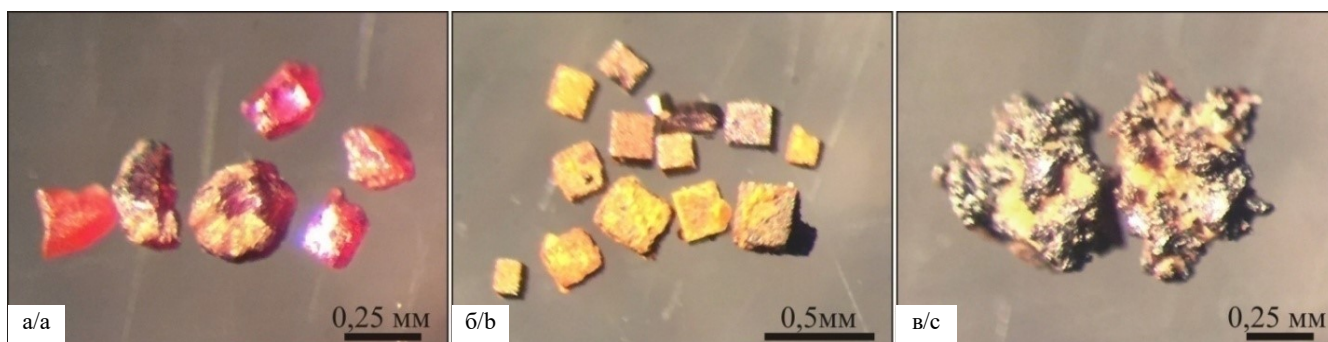


Рис. 3. Рудные минералы протоочки межпластовой жилы известняка L<sub>6</sub>: а – угловатые зерна киновари; б – кубические кристаллы пирита с лимонитовой оторочкой; в – зерна гетита неправильной формы / Fig. 3. Ore minerals of interlayer vein in limestone: a - angular cinnabar grains; b - cubic pyrite crystals with limonite edging; c - irregular-shaped goethite grains

## Обсуждение результатов и выводы

Совместное нахождение кристаллов кварца призматического и ромбоэдрического габитусов установлено на многих ртутных месторождениях и проявлениях Донбасса (в пределах Никитовского рудного поля, Ольховатско-Волынцевской антиклинали [1, 19] и др.). Характерным для Донбасса является и повсеместное присутствие разновозрастных генераций киновари (Никитовское, Дружковско-Константиновское рудные поля и др.), изменение формы кристаллов которой связано с температурой кристаллизации [5, 20]. На Докучаевском проявлении наиболее распространенная генерация киновари нередко содержит мелкие кристаллы кварца с антраксолитом [1].

Полученные результаты указывают, что в пределах Селезневского угленосного района проявляются признаки, указывающие на перспективы выявления ртутной минерализации (с кварц-диккит-киноварным типом оруденения [11]). Наиболее благоприятными рудолокализующими структурами выступают межслоевые трещины присводовых частей складок третьего порядка, связанные с надвиговыми дислокациями, контролирующими развитие жильных тел с друзовыми полостями. Для последних характерно наличие нескольких генераций кварца, включая «диаманты Донбасса», что указывает на длительное стадийное проявление углекислотно-водной гидротермальной системы.

## Литература

1. *Зацеха Б.В.* Кристаллогенезис и типоморфные особенности минералов ртутного и флюоритового оруденений Украины. Киев: Наукова думка, 1989. 192 с.
2. *Зинчук И.Н., Калюжный В.А., Щирица А.С.* Флюидный режим гидротермального минералообразования Центрального Донбасса. Киев: Наукова думка, 1984. 104 с.
3. *Антонов В.М., Штанченко М.С., Ткач Б.И.* Новый тип жильной минерализации в породах карбона // *Материалы по геологии Донецкого бассейна*. М.: Недра, 1968. С. 179–181.
4. *Штанченко М.С., Сиденко О.Г.* Жильные проявления в породах карбона южной части Луганской области и зональность гидротермальной минерализации // *Материалы по геологии Донецкого бассейна*. М.: Недра, 1968. С. 161–164.
5. *Головченко Н.Г., Мазь Н.И., Симкив Ж.А.* О некоторых условиях формирования ртутных месторождений // *Термобарогеохимия и рудогенез*. Владивосток, 1980. С. 188–192.
6. *Тихоненкова Е.Г.* К минералогии ртутных проявлений Восточного Донбасса // *Степановские чтения*: тез. докл. обл. геол. конф. Артемовск, 1986. С. 82–83.

7. *Зубов В.И.* Кристалломорфология киновари и ее использование при поисках ртутных месторождений. М.: Недра, 1976. 80 с.

8. *Возняк Д.К., Павлишин В.И.* О кварце с включениями углеводов из жильных образований Донецкого бассейна // *Углерод и его соединения в эндогенных процессах минералообразования*. Львов, 1975. С. 54–55.

9. *Гурський Д.С., Єсипчук К.Ю., Калінін В.І., Куліш С.Щ. и др.* Металічні і неметалічні корисні копалини України. Київ; Львів: Центр Європи, 2005. Т. 1. 785 с.

10. *Китык В.Н., Белоус И.Р., Долишний Б.В. и др.* Ртутоносность соляных куполов Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Наукова думка, 1984. 168 с.

11. *Багатаев Р.М., Роговой В.М.* Геологическое изучение и освоение Никитовских ртутных месторождений Донбасса (Украина). М.: Научный мир, 2011. 182 с.

12. *Зубов В.И., Багатаев Р.М., Полукеев Л.И.* Некоторые черты модели ртутного оруденения кварц-диккитового типа по данным изучения глубоких горизонтов Никитовского месторождения // *Условия локализации сурьмяно-ртутного и флюоритового оруденения рудных полей*: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991. С. 53–62.

13. *Зинчук И.Н.* Геохимия мінералоутворюючих растворов золото-поліметалевих рудопроявів Центрального Донбасу : дис. ... канд. геол. наук. Львів, 2003. 27 с.

14. *Крисак О.С., Павлов И.О.* Структурно-тектонические особенности формирования трещинных структур Селезневского угленосного района Донбасса // *Инновационные перспективы Донбасса*: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. Донецк, 2020. С. 48–53.

15. *Гинтов О.Б.* Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.

16. *Корчемагин В.А., Рябоштан Ю.С.* Тектоника и поля напряжений Донбасса // *Поля напряжений и деформаций в земной коре*. М.: Наука, 1987. С. 164–170.

17. *Крисак О.С.* Сравнительная характеристика типоморфизма кварца с углеводородными включениями Донбасса и Карпат // *Практика геологов на производстве*: сб. тр. IV Всерос. студ. науч.-практ. конф. / ЮФУ, г. Ростов-на-Дону. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2019. С. 95–98.

18. *Лазаренко Е.К., Панов Б.С., Груба В.И.* Минералогия Донецкого Бассейна. Киев: Наукова думка, 1975. Ч. II. 502 с.

19. *Горовой А.Ф.* Кварц ртутных месторождений Никитовского рудного поля // *Типоморфизм кварца Украины*. Киев: Наукова думка, 1974. С. 86–92.

20. *Головченко Н.Г.* Об условиях формирования ртутных месторождений Закарпатья и Донбасса // *Вестн. Львов. ун-та. Сер. геол.* 1971. № 5. С. 14–19.

## References

1. Zatsiha B.V. (1989). *Crystallogenesis and typomorphic features of mercury and fluorite mineralization minerals in Ukraine*. Kiev, Naukova dumka Publ., 192 p. (in Russian).
2. Zinchuk I.N., Kalyuzhny V.A., Shchiritsa A.S. (1984). *Fluid regime of hydrothermal mineral formation of the Central Donbass*. Kiev, Naukova dumka Publ., 104 p. (in Russian).
3. Antonov V.M., Shtanchenko M.S., Tkach B.I. (1968). New type of vein mineralization in carboniferous rocks. *Materials on the geology of the Donetsk Basin*. Moscow, Nauka Publ., pp. 179-181. (in Russian).
4. Shtanchenko M.S., Sidenko O.G. (1968). Vein manifestations in Carboniferous rocks of the southern part of the Luhansk region and zonation of hydrothermal mineralization. *Materials on the geology of the Donetsk Basin*. Moscow, Nedra Publ., pp. 161-164. (in Russian).
5. Golovchenko N.G., Maz' N.I., Simkiv J.A. (1980). On some conditions for the formation of mercury deposits. *Thermobarogeochemistry and ore formation*. Vladivostok, pp. 88-192. (in Russian).
6. Tikhonenkova E.G. (1986). On the mineralogy of mercury manifestations of the Eastern Donbass. *Stepanov readings. Abstracts of reports of the regional geol. conf.* Artemovsk, pp. 82-83. (in Russian).
7. Zubov V.I. (1976). *Crystal morphology of cinnabar and its use in the search for mercury deposits*. Moscow, Nedra Publ., 80 p. (in Russian).
8. Voznyak D.K., Pavlishin V.I. (1975). About quartz with inclusions of hydrocarbons from vein formations of the Donetsk basin. *Carbon and its compounds in endogenous processes of mineral formation*. Lviv, pp. 54-55. (in Russian).
9. Gursky D.S., Yesipchuk K.Yu., Kalinin V.I., Kulish E.Shch. et al. (2005). *Metallic and non-metallic minerals of Ukraine*. Kiev, Lviv, Tsentrv Evropy Publ., vol. 1, 785 p. (in Ukrainian).
10. Kityk V.N., Belous I.R., Dolishniy B.V. et al. (1984). *Mercury-bearing salt domes of the Dnieper-Donetsk basin*. Kiev, Naukova dumka Publ., 168 p. (in Russian).
11. Bagataev R.M., Rogovoy V.M. (2011). *Geological survey and development of Nikitovsk mercury deposits in Donbass (Ukraine)*. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 182 p. (in Russian).
12. Zubov V.I., Bagataev R.M., Polukeev L.I. (1991). Some features of the model of mercury mineralization of quartz-dickite type according to the study of deep horizons of the Nikitovskoye deposit. *Conditions of localization of antimony-mercury and fluorite mineralization of ore fields*. Collection of Scientific Works. Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. Branch, pp. 53-62. (in Russian).
13. Zinchuk I.N. (2003). *Geochemistry of mineral-forming solutions of gold-polymetallic ore occurrences of the Central Donbass*. Dissertation Thesis. Lviv, 27 p. (in Ukrainian).
14. Krisak O.S., Pavlov I.O. (2020). Structural and tectonophysical features of formation of fractured structures of the Seleznevsk coal-bearing area of Donbass. *Innovative perspectives of Donbass*. Materials of the 6th International Scientific Conference. Donetsk, pp. 48-53. (in Russian).
15. Gintov O.B. (2005). *Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the earth's crust in Ukraine*. Kiev, Feniks Publ., 572 p. (in Russian).
16. Korchemagin V.A., Ryaboshtan Y.S. (1987). Tectonics and stress fields of Donbass. *Stress fields and deformations in the earth's crust*. Moscow, Nauka Publ., pp. 164-170. (in Russian).
17. Krisak O.S. (2019). Comparative characteristics of quartz typomorphism with hydrocarbon inclusions of Donbass and Carpathians. *Practice of geologists in production*. Proceedings of the IV All-Russian Student Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, pp. 95-98. (in Russian).
18. Lazarenko E.K., Panov B.S., Gruba V.I. (1975). *Mineralogy of the Donetsk Basin*. Kiev, Naukova dumka Publ., part II, p. 502. (in Russian).
19. Gorovoy A.F. (1974). Quartz of mercury deposits of the Nikitovsk ore field. *Typomorphism of quartz of Ukraine*. Kiev, Naukova dumka Publ., pp. 86-92. (in Russian).
20. Golovchenko N.G. (1971). On the conditions for the formation of mercury deposits in Transcarpathia and Donbass. *Vestnik L'vov. un-ta. Ser. Geol.*, No. 5, pp. 14-19. (in Russian).

УДК 379.85 (911.5, 911.6)

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-73-80

## ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ И РАЗМЕЩЕНИЯ ИГОРНЫХ ЗОН В РАЗЛИЧНЫХ СТРАНАХ МИРА

© 2021 г. Д.В. Максимов<sup>1</sup>, А.А. Жуликов<sup>1</sup>, А.Д. Максимова<sup>1</sup><sup>1</sup>Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

## FEATURES OF THE ORGANIZATION AND LOCATION OF GAMBLING ZONES IN DIFFERENT COUNTRIES OF THE WORLD

D.V. Maksimov<sup>1</sup>, A.A. Zhulikov<sup>1</sup>, A.D. Maksimova<sup>1</sup><sup>1</sup>Kuban State University, Krasnodar, Russia

Максимов Дмитрий Васильевич – кандидат географических наук, доцент, кафедра международного туризма и менеджмента, Институт географии, геологии, туризма и сервиса, Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Россия, e-mail: dvmaksimov68@mail.ru

Dmitriy V. Maksimov - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of International Tourism and Management, Institute of Geography, Geology, Tourism and Service, Kuban State University, Stavropolskaya St., 149, Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: dvmaksimov68@mail.ru

Жуликов Антон Андреевич – старший преподаватель, кафедра международного туризма и менеджмента, Институт географии, геологии, туризма и сервиса, Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Россия, e-mail: hopkins88@inbox.ru

Anton A. Zhulikov - Senior Lecturer, Department of International Tourism and Management, Institute of Geography, Geology, Tourism and Service, Kuban State University, Stavropolskaya St., 149, Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: hopkins88@inbox.ru

Максимова Александра Дмитриевна – аспирант, кафедра международного туризма и менеджмента, Институт географии, геологии, туризма и сервиса, Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Россия, e-mail: madmax@mail.ru

Aleksandra D. Maksimova - Postgraduate, Department of International Tourism and Management, Institute of Geography, Geology, Tourism and Service, Kuban State University, Stavropolskaya St., 149, Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: madmax@mail.ru

Рассматриваются особенности организации и пространственного размещения игорных зон в различных странах мира. Отмечается, что на этот процесс (запрет, ограничение или повсеместное разрешение) влияют в первую очередь культурные особенности населения, что транслируется на отношение органов власти и управления в отдельных государствах к игорному бизнесу (ИБ). В результате исследования было выявлено, что государства по данной проблематике разделяются по цивилизационному признаку. В странах, где господствующей религией является ислам, ИБ, как правило, запрещен (хотя разрешены ставки на бегах, собачьих боях). В странах, входящих в орбиту англосаксонского мира (подавляющее большинство стран Америки, Африки, Европы, Австралии и Океании), ИБ разрешен повсеместно с некоторыми ограничениями. В монархиях Востока он разрешен для иностранцев, но запрещено играть местному населению. В России, исламской Азии (православие, мировые восточные религии) приняты меры по ограничению ИБ – он разрешен только на специально отведенных территориях – игорных зонах. Направляется вывод о необходимости компромисса между обществом, органами государственной власти и бизнесом при организации этих зон в РФ. При этом стоит учитывать и адаптировать зарубежный опыт к российским условиям.

**Ключевые слова:** игорный бизнес, игорная зона, казино, факторы размещения игорного бизнеса, азартные игры, территориальная организация, туристско-рекреационная система.

The features of the organization and spatial placement of gambling zones in various countries of the world are considered. It is noted that this process (prohibition, restriction or widespread permission) is primarily influenced by the cultural characteristics of the population, which translates into the attitude of the authorities and administration in certain states to-

wards the gambling business. As a result of the study, it was revealed that the states on this issue are divided according to civilization. In countries where Islam is the dominant religion, gambling is, as a rule, prohibited (although betting on races and dog fights is allowed). In countries belonging to the orbit of the Anglo-Saxon world (the vast majority of countries in America, Africa, Europe, Australia and Oceania), gambling is allowed everywhere, with some restrictions. In the monarchies of the East, gambling is allowed for foreigners, but the local population is prohibited from playing. In Russia, non-Islamic Asia (Orthodoxy, world oriental religions), measures have been taken to restrict the gambling business - it is allowed only in specially designated areas - gambling zones. This suggests a conclusion about the need for a compromise between society, government bodies and business when organizing these zones in the Russian Federation. At the same, it is worth taking into account and adapting foreign experience to Russian conditions.

**Keywords:** gambling business, gambling zone, casinos, gambling business location factors, gambling, territorial organization, tourist and recreational system.

## Введение

В любой стране мира игорный бизнес (ИБ) является одним из самых высокодоходных вложений капитала, не только принося баснословный доход его владельцам, но и обеспечивая пополнение государственного бюджета. Например, в Макао (Китай) прямые и косвенные поступления от данного вида деятельности обеспечивают до 70 % доходной части бюджета города [1]. За счет этого у государственных и муниципальных органов власти имеется возможность реализовывать многие социально необходимые программы. Несмотря на высокую эффективность, далеко не во всех странах мира ИБ разрешен. Причиной этого является морально-духовная сторона азартных игр, в связи с чем в различных странах выработаны свои подходы к организации и регулированию бизнеса [2].

Важным рычагом воздействия на экономику региона и страны являются игорные зоны (ИЗ) как зоны с особым режимом хозяйствования, существенно влияющие на формирование территориальных социально-экономических систем, в том числе и туристско-рекреационных. В Краснодарском крае впервые в России получила развитие такая новая форма организации туристско-рекреационной системы, как ИЗ в виде туристского кластера «Азов-Сити» [3]. Несомненно, реализация такого мегапроекта на территории края должна была послужить мощным катализатором повышения инвестиционной активности в регионе. Однако уже в 2010 г. (всего через год после открытия первых двух казино) произошло падение инвестиционной привлекательности этого объекта, после чего его неоднократно переносили в другие муниципалитеты Краснодарского края (Анапа и Сочи) [3–9].

Вышеотмеченное требует серьезного пространственного подхода к пересмотру мер государственного регулирования в сфере ИБ с целью их переориентации на компромисс между обществом, органами государственной власти и бизнесом за счет применения наиболее адаптированного к российским условиям зарубежного опыта.

Это предопределяет необходимость систематизации различных подходов зарубежных стран к сфере азартных игр для выявления факторов, влияющих на организацию ИБ и применения этого опыта в России.

## Материалы и методы исследования

В отечественной научной литературе практически не уделяется внимания теоретическим и методологическим подходам исследования ИЗ. В то же время они постепенно вводятся в эксплуатацию (с 2009 г. в Краснодарском крае, с 2016-го – в Калининградской обл. и т.д.) и занимают свое место в территориальных экономических системах регионов. Полагаем, что при принятии законов, регулирующих деятельность по организации и проведению азартных игр, многие важные организационные моменты (в том числе местоположение зон) не были должным образом отработаны и на федеральном, и на региональном уровнях [10, 11]. Предлагаем систематизировать сведения об отношении различных государств к этому бизнесу, чтобы понять логику парламентариев и причины различных подходов.

Основные методы, используемые в работе: статистическое наблюдение (сплошное специально организованное документальное наблюдение), графическое изображение данных (картографический) и сравнение. Источники информации: федеральное законодательство [10–14], данные интернет-сайтов некоммерческих игорных ассоциаций [2, 9, 15], муниципалитетов [16], а также публикаций в СМИ [4–7, 17–25], профильных (туристских) журналах [26], научных сборниках и журналах [1, 3, 8, 27].

## Результаты и их обсуждение

Особенностью рынка игорных услуг является то, что условия функционирования игорных заведений (казино, автоматы, тотализаторы, лотереи и проч.) в различных странах отличаются большим разнообразием.

При исследовании пришлось столкнуться с серьезной дифференциацией правовых норм в отдельных государствах мира. Варианты сочетаний разрешенных и неразрешенных отдельных азартных игр, форм участия государства настолько разнообразны и на первый взгляд не поддаются логике, что классифицировать их трудно. Например, только казино и игровые автоматы в разных странах могут:

- функционировать лишь в пределах особых территорий;
- распространяться повсеместно (магазины, гостиницы, отдельные здания, автозаправки и т.д.) во всех муниципалитетах;
- распространяться повсеместно, но количество столов, аппаратов четко ограничено;
- размещаться только в гостиницах;
- формально запрещаться, но функционировать открыто;
- могут быть разрешены аппараты, но запрещены казино, и наоборот;
- запрещаться повсеместно без крупье (с ведущим, имеющим специальное разрешение, можно играть);
- запрещены аппараты и казино, но разрешены повсеместно тотализаторы и букмекерские конторы;
- разрешены только онлайн-казино и автоматы;
- разрешены наземные (физические) игорные заведения, но запрещены онлайн-заведения.

Под азартными играми (игры на деньги) в одних странах могут пониматься только казино и игровые автоматы, тотализаторы, а ставки на скачках, в настольных играх, петушиных, собачьих боях, тараканьих бегах к запрещенным (азартным) видам развлечений могут не относиться.

Французское слово *hasard* (случай, риск) означает увлечение, задор, запальчивость, горячность. Невинное влечение, казалось бы, к простой игре во что-нибудь (даже не на деньги – аттракционы, например) ведет к сопутствующим различным рискам. Зачастую человек уже не может сам себя остановить, попадая в болезненную зависимость. Не вдаваясь глубоко в моральную сторону этого явления, а ныне – вида бизнеса, отметим, что негативные аспекты игорной сферы периодически приводили к тому, что общественные силы требовали от органов власти закрытия такого рода заведений, дабы прекратить моральное разложение населения и обеспечить спокойную жизнь граждан страны.

Формы участия государства также разнообразны:

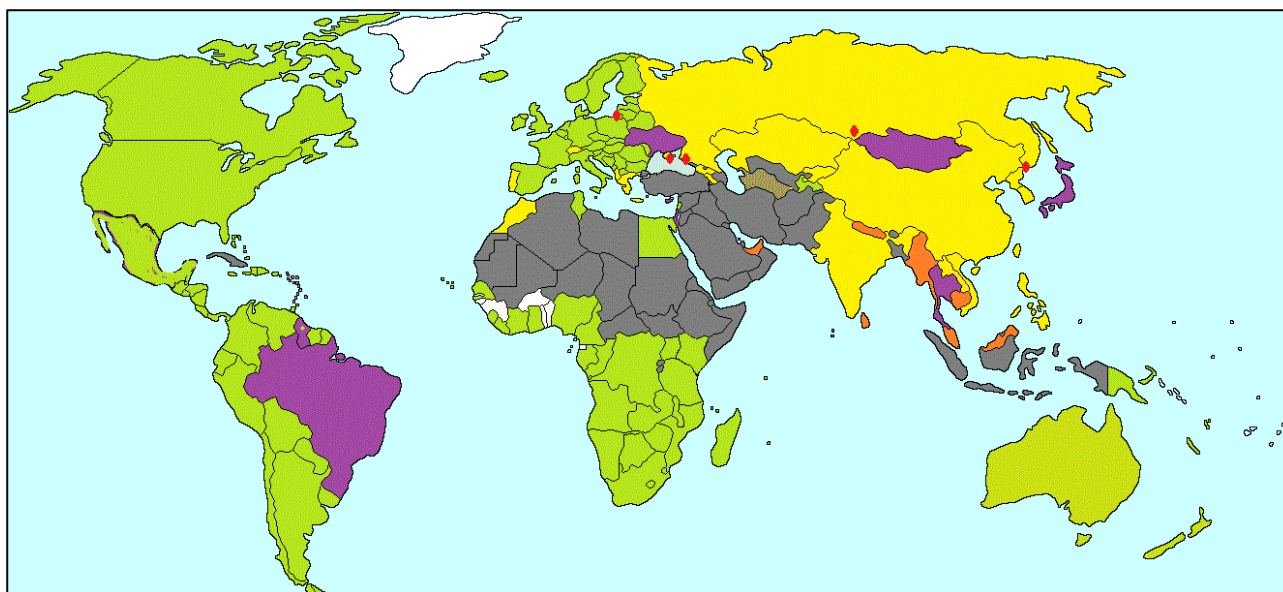
- государство может выдавать разрешение всем желающим открыть заведения при соблюдении каких-либо условий;
- деятельность игровых залов может организовывать только государственный оператор (или государственный и частный операторы);

– может не выдавать никаких разрешений, но жестко контролировать налоговый режим игорных заведений.

Этот перечень можно дополнить вариантами, учитывающими разрешение играть только иностранным туристам (местному населению – запрещено). На рисунке выделены страны лишь по двум классификационным признакам – особенностям территориального расположения казино, залов с игровыми аппаратами и тотализаторов, а также участию в играх местного населения.

На рисунке отчетливо видны «цивилизационные разломы»: так, в англосаксонском пространстве, (западный мир) и странах, тяготеющих к нему (Западная, Центральная, почти вся Восточная Европа, Северная и Латинская Америка, Австралия и Океания, Экваториальная и Южная Африка), разрешены азартные игры практически повсеместно. В некоторых странах весьма осторожно относятся к азартным играм, что ограничивает их организацию и функционирование (Польша, Швеция, Финляндия и др.). Например, в Польше разрешено иметь казино в городах из расчета одно заведение на 250 тыс. чел., при этом в сельском округе не должно быть более одного казино на 650 тыс. чел. [5]. Условия получения лицензии на организацию азартных игр настолько серьезны, что обладать ею фактически могут единицы, а объявлений о продаже таких заведений нигде нет (они не продаются или продаются «с колес»). Открыть их могут и нерезиденты, но при условии проживания в стране более 3 лет и сдачи экзамена по польскому языку.

В большинстве европейских стран многие виды азартных игр сегодня легализованы и управляются частным капиталом. Правда, почти во всех развитых странах Европы их полностью контролирует государство. Например, в Финляндии компания RAY руководствуется публичным правом и принадлежит государству, имеет лицензию на эксплуатацию 500 игорных столов вне казино, 20 тыс. игровых автоматов и одного казино в Хельсинки. В Швеции азартные игры проводит государственный оператор лотерей Svenska Spel, который получил от правительства разрешение на установку в государстве 7,5 тыс. игровых автоматов и работу 4 казино. Аналогичная ситуация существует и в Израиле, где оператор государственных лотерей Mifal Nara'uis получил право на эксплуатацию 500 игровых автоматов в ресторанах и барах страны. В Австрии действуют 2 оператора азартных игр (на 70 % принадлежат государству): «Австрийские лотереи» и «Австрийские казино». В Нидерландах и Княжестве Монако монополия на организацию азартных игр в казино принадлежит только государству [5].



Цветом обозначены страны, в которых:

	- разрешено повсеместное размещение игорных заведений;
	- игорные заведения размещаются в определенных зонах (игорных);
	- игорный бизнес запрещен;
	- посещение игорных заведений разрешено только иностранцам;
	- планируют легализовать игорный бизнес в ближайшее время;
	- игорный бизнес запрещен, но фактически открыто действует;
◆	- игорные зоны России

Карта ИЗ мира в 2020 г. (составлено автором по материалам интернет-сайтов)

/ Map of the gambling zones of the world in 2020 (compiled by the author based on materials from Internet sites)

В Греции функционируют всего девять казино, шесть из которых принадлежат государству. В Португалии существуют 10 ИЗ на территории муниципалитетов – туристических центров государства. С организаторами игр в ИЗ (резидентами зон) государство заключает договоры на 20–30 лет с обязательной регистрацией. В Греции, Франции и Люксембурге запрещено эксплуатировать игровые автоматы. Особое отношение государства к ИБ сложилось в Швейцарии, где отсутствует государственная монополия на проведение игр на деньги.

Менее жесткие требования установлены в странах Европы с переходной моделью экономики (восточноевропейские страны, отстающие от западноевропейских по уровню жизни населения), для которых этот вид доходной статьи бюджета является более значимым, чем в Западной Европе: Болгарии, Румынии, Польше, Словакии, Хорватии, Чехии, Черногории и Македонии, до недавних пор – и на Украине (до 2009 г.). Нужно отметить, что лицензировать онлайн-казино или покер-рум удобнее всего в офшорных зонах – на Кипре, Кюрасао, Антильских островах, Гибралтаре, Сейшельских ост-

ровах. При этом на Кипре и Антильских островах ИБ запрещен, можно играть только в онлайн-казино.

Из всех перечисленных макрорегионов западного мира, где разрешены повсеместно игорные заведения при получении лицензии, только несколько стран фактически определили ИЗ, ограничив этот вид бизнеса на определенной территории – в ИЗ (как в Португалии) или в отдельных местах (как правило, в ограниченном круге гостиниц): Греция, Португалия, Швейцария, Люксембург, Албания. В Южной и Экваториальной Африке (берег Гвинейского залива, Западная Африка), Латинской Америке азартные игры разрешены повсеместно. Как правило, места для их проведения организованы в гостиницах. В основном инвесторами выступают американские и европейские операторы, хотя в Африке часто встречаются и восточноевропейские (Украина, Хорватия, Венгрия и проч.).

Сегодня азартные игры запрещены на Украине, Кипре (греческая часть), в Лихтенштейне, Сан-Марино, Ватикане (что естественно), Бразилии, на Антильских островах (только онлайн-игры), в Гайане и на Кубе. Ряд перечисленных стран ввиду

сложной экономической ситуации серьезно продумывает варианты легализации ИБ (Украина, Кипр, Бразилия, Гайана).

Остальные страны мира сравнительно осторожно относятся к азартным играм, особенно резидентов, своих граждан. При этом часть государств по религиозным убеждениям в принципе отказалась от этого «порочного» бизнеса (в основном исламский мир). Другая часть стран, борясь с азартом жителей, ограничила этот бизнес пространственно, определив его в резервации – ИЗ (почти все страны Центральной, Южной, Юго-Восточной, Дальневосточной Азии и Россия).

В большинстве стран мира, где господствующей религией является ислам, азартные игры запрещены. Исключения составляют Марокко, Тунис, Египет, Кыргызстан и Таджикистан. В Марокко и Кыргызстане игровые клубы расположены в определенных гостиницах (по своему характеру напоминают зоны), в Тунисе, Египте и Таджикистане они размещены повсеместно исключительно в отелях.

В ряде стран исламского мира казино и игровые автоматы разрешены в отдельных отелях, но посещать их могут только иностранцы: ОАЭ, Малайзия. Это не значит, что казино и азартных игр в исламских странах не существует – они есть, но открыты подпольно и не платят налогов. Наиболее абсурдная ситуация сложилась в Туркменистане, где азартные заведения запрещены, но при этом открыто функционируют в центре Ашхабада в ряде гостиниц (именно здесь расположено самое крупное казино Центральной Азии).

Полностью запрещена игорная деятельность в Афганистане, Пакистане, Катаре, Кувейте, Йемене, Бахрейне, Саудовской Аравии, Омане, Сирии, Бангладеш, Таиланде, Бутане, на Мальдивских островах, в Иордании, Восточном Тиморе, Индонезии, Иране, Узбекистане, Азербайджане и Турции. В Малайзии, где узаконены казино, простые пари и скачки, существует четыре игорных центра, но представителям ислама играть запрещено. Конечно, это не означает, что граждане этих стран не играют в азартные игры: для этого они выбирают другие страны, вывозя валюту из страны.

Третьим макрорегионом мира (и вторым, где разрешены игры) является Азиатский неисламский, к которому примыкает и Россия. Казахстан мы отнесли тоже к нему, так как его трудно назвать исламским государством: представителей ислама и христианства в нем поровну, а около 10 % населения – атеисты.

Почти во всех этих странах азартные заведения разрешены, но расположены в ИЗ (в Китае – 2, Индии – 5, России – 4, Казахстане – 2 и т.д.). В Непале, Шри-Ланке, Мьянме, Камбодже в ограниченном

количестве игорных заведений могут играть исключительно иностранцы. В Бутане, Таиланде и Японии азартные игры пока запрещены, но обсуждаются законопроекты по их разрешению ввиду серьезного бюджетного дефицита в Японии и Таиланде. В Монголии часть видов азартных игр уже разрешена (с 2016 г. – тотализаторы), а также ведется работа по вступлению в Гонконгский жокейский клуб (ставки на бега). Планируется открытие в ряде гостиниц казино для привлечения китайских и российских туристов.

Важной мировой тенденцией ИБ является усиление позиций азиатских стран, в первую очередь юго-востока континента. Азию можно назвать первооснователем азартных игр. Первые игорные заведения появились именно в Японии и Китае, а не в Старом Свете. Сейчас США являются неизменным лидером и самым крупным рынком игровой индустрии, но данная ситуация в ближайшее время изменится. PWC уверенно заявляет, что на протяжении ближайших пяти лет ежегодный рост прибыли азиатского и тихоокеанского рынков составит 5 %, что сделает эти рынки несомненными лидерами на планете (доля США составила к 2020 г. примерно 40 % от всего объема, а азиатский рынок достиг 43–45 %) [15].

Реальные успехи азиатских рынков подтверждаются следующими данными: доход от азартной индустрии Индии в 2019 г. вырос на 2 % по сравнению с 2018 г. и достиг отметки в 60 млрд долл. На территории страны работали 8 тыс. игровых столов, которые располагались в 3, а затем в 5 ИЗ.

Согласно отчету 2016 г., проведенному исследовательской и консалтинговой фирмой Global Market Advisors, индийский рынок может работать гораздо лучше. GMA прогнозирует, что, если рынок Индии будет обслуживаться грамотно, к 2025 г. общий доход от азартных игр может составить около 10,2 млрд долл. при условии, что к 2021 г. будет открыто достаточное количество игорных помещений. В этой индустрии задействовано 679 тыс. чел., сумма зарплаты которых составила 30 млрд долл. В бюджет страны и штатов ежегодно перечисляется до 9 млрд долл. [23].

Игорный рынок Индии строго регулируется – доминирует всего несколько компаний. Одна из них, Delta Corp, получила три из шести существующих лицензий, доступных для офшорных игр в Гоа. Казино разрешены только как часть 5-звездочных отелей – это создает барьер для игр. В целом существует значительный интерес к азартным играм, но огромное население страны по-прежнему не имеет к ним доступа.

Несмотря на то что в Китае азартные игры запрещены, в анклавах – бывших колониях европей-

цев (Макао, Гонконг) они разрешены. Причем Макао уже в 2012 г. стал крупнейшим мировым центром, столицей ИБ. ИБ, включающий казино, лотереи, ипподром, собачьи бега и подпольные игровые притоны, – важнейшая сфера экономики этого города, замена которой в ближайшие десятилетия не предвидится (скорее не имеет смысла). Легализовали игорную отрасль в Макао еще в 1847 г., однако стремительное развитие индустрии началось в 1962 г., когда компания-монополист STDM (Sociedade de Turismo e Diverses de Macau) получила право на организацию азартных игр в регионе. Сегодня 33 казино приносят годовой доход в размере около 28 млрд долл., что в 3 раза больше дохода 135 казино в Лас-Вегасе. Отсутствие в Макао налога на выигрыш делает его фаворитом среди серьезных азартных игроков. В 2018 г. Макао на 40 % обеспечил бюджет за счет азартных заведений, а с учетом косвенного эффекта – на 70 % [2].

Все вышеперечисленные формулы организации азартного бизнеса являются успешными и позволяют, с одной стороны, существенно ограничить его развитие, с другой – перенаправить деньги игроков на социально значимые цели через государственный бюджет.

Всё чаще казино в своем классическом виде уже становятся легендой прошлого, а на смену им приходят многофункциональные комплексы, которые помимо ИБ включают в себя гостиничный и развлекательный потенциал и ориентируются на запросы всех слоев населения. Так, в мусульманской Малайзии самое крупное высокогорное Casino de Genting имеет 426 игорных столов, 3140 автоматов и гостиницу на 7000 номеров. Громадная площадь казино готова принять одновременно более 20 тыс. чел., желающих наблюдать и следить за соревнованиями и мероприятиями, которые проходят в игровом зале [5].

### Выводы

Можно констатировать, что условия организации и функционирования игорных заведений в странах мира зависят:

– от национальных, религиозных, цивилизационных традиций в стране, что определяет отношение общества к ИБ;

– отношения местного населения непосредственно в местах создания ИЗ, которое может существенно отличаться от общегосударственной позиции;

– экономической ситуации в конкретной стране и принимающем регионе.

В России, как и во всём мире, также возможна организация крупных многофункциональных игор-

ных заведений типа «Венеция» (Макао), Но Tram Strip (Вьетнам) и др. Таковым центром и стал в итоге комплекс «Горки Город», где ввод в действие казино «Сочи» позволил сгладить сезонные колебания турпотока, повысил среднегодовую загрузку отелей и инвестиционную привлекательность лучшего российского курорта и туристского бренда территории.

### Литература

1. Терещенко А.В. Сравнительный анализ предпринимательской деятельности игорной зоны «Приморье» и других игорных зон мира // *Международ. журн. прикл. и фунд. исследований*. 2016. № 7. С. 307–311.

2. Рынок азартных игр // *Ксилон Байкс*. URL: <http://www.xylonbikes.com/news/rynok-azartnyh-igr-23-01-12.html> (дата обращения: 02.12.2019).

3. Максимов Д.В., Беликов М.Ю., Рябошапко В.П., Зеленский А.А. Новая игровая зона «Азов-Сити» // *Географические исследования Краснодарского края: сб. науч. тр. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2009. Вып. 4. С. 228–229.*

4. Вице-губернатор Золина: На месте «Азов-Сити» могут построить кадетский корпус // *9ТВ*. URL: <http://9tv.ru/news/item/42939> (дата обращения: 23.10.2014).

5. Гетманцев Д. Рынок азартных игр: требуется организация // *ZN, UA*. URL: [https://zn.ua/ECONOMICS/rynok\\_azartnyh\\_igr\\_trebuetsya\\_organizatsiya.html](https://zn.ua/ECONOMICS/rynok_azartnyh_igr_trebuetsya_organizatsiya.html) (дата обращения: 02.02.2015).

6. Госдума дала «зеленый свет» игорной зоне в Сочи // *РБК*. URL: <http://top.rbc.ru/politics/04/07/2014/934453.shtml> (дата обращения: 02.02.2015).

7. Игорный бизнес в Крыму для пополнения казны // *Itecanet IT*. URL: <http://itecanet.ru/it-novosti/2014/03/31/igornyj-biznes-v-krymu-dlya-popolneniya-kozny/> (дата обращения: 12.06.2014).

8. Максимов Д.В., Евстафьев А.И., Чамоков Д.М. Экономико-географический анализ концептуальных альтернатив развития игорных зон в Краснодарском крае // *Изв. Саратовского ун-та. Экономика. Управление. Право*. 2014. № 2-2 (14) С. 393–401.

9. Первое казино в алтайской игорной зоне «Сибирская монета» откроется в апреле // *НО «Ассоциация развития игорной зоны Азов-Сити»*. URL: <http://www.azov-city-gr.ru/ru/new/4332/> (дата обращения: 02.03.2016).

10. О внесении изменений в Федеральный закон «О государственном регулировании деятельности по организации и проведению азартных игр и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации»: Федеральный закон от 22.07.2014 № 278-ФЗ // *Официальный интернет-портал правовой информации*. URL: <http://pravo.gov.ru:8080/Document/View/0001201407230001?index=4&rangeSize=1> (дата обращения: 31.12.2020).

11. О государственном регулировании деятельности по организации и проведению азартных игр и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон Российской Федерации от 29.12.2006 № 244-ФЗ (ред. от 23.07.2013) // СПС «Консультант плюс». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64924/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64924/) (дата обращения: 25.01.2021).

12. О государственном регулировании деятельности по организации и проведению азартных игр и о внесении изменений в некоторые законодательные акты: Федеральный закон от 24 июля 2009 года № 211-ФЗ // СПС «Консультант плюс». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64924/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64924/) (дата обращения: 25.01.2021).

13. Об особых экономических зонах в Российской Федерации: Федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2005 № 116-ФЗ // СПС «Консультант плюс». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_54599/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_54599/) (дата обращения: 25.01.2021).

14. О порядке управления игорной зоной на территории Щербиновского района Краснодарского края и Азовского района Ростовской области и взаимодействия органов исполнительной власти Ростовской области и Краснодарского края при осуществлении государственного регулирования деятельности по организации и проведению азартных игр: Соглашение от 30.01.2007 // СПС «Консультант плюс». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_89870/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_89870/) (дата обращения: 25.01.2021).

15. Мировой рынок азартных игр // Lazy-Z.com – разработчик программ для азартных игр казино. URL: <http://www.lazy-z.com/rus/article/articles.php?id=336> (дата обращения: 03.04.2020).

16. Проект «Золотые пески» // Городской информационный портал города-курорта Анапа. URL: <http://www.anapa.info/sobitiya/proekt-zolotie-peski/> (дата обращения: 16.06.2013).

17. Быстрова Т. Сочи: новый город – новые возможности // Курортный Олимп. 2014. 24 нояб. С. 6–9.

18. В «Азов-Сити» будут новые казино // Ведомости. URL: <http://www.vedomosti.ru/newspaper/article/472711/> (дата обращения: 31.01.2015).

19. В бюджете Кубани на 2011 год не предусмотрены расходы на перенос «Азов-Сити» // ЮГА.ру. URL: <http://www.yuga.ru/news/206883/> (дата обращения: 31.01.2015).

20. Власти Кубани и инвесторы продолжают развивать «Азов-Сити» на прежнем месте // ЮГА.ру. URL: <http://www.yuga.ru/news/298565/> (дата обращения: 14.06.2013).

21. Границы игорной зоны «Азов-Сити» сдвигаются в сторону Анапы // ЮГА.ру. URL: <http://www.yuga.ru/news/256214/> (дата обращения: 02.04.2014).

22. Игорная зона будет в Сочи // Пронедра. URL: <http://pronedra.ru/politics/2014/05/31/igornaya-zona-sochi/> (дата обращения: 12.06.2014).

23. Рынок азартных игр в интернете в мире превысил \$387 миллиардов // Финансовый обзор. URL: <http://www.finobzor.com.ua/novosti/nid/5111> (дата обращения: 02.02.2020).

24. Сопки, покрытые лесом // Ведомости. URL: [http://www.vedomosti.ru/img/newslines/2012/09/21/4206051\\_news\\_pic1.GIF](http://www.vedomosti.ru/img/newslines/2012/09/21/4206051_news_pic1.GIF) (дата обращения: 02.04.2015).

25. Сочи и Крым заиграют // БСН. URL: [http://www.bsn.ru/news/interesting/russia/38044\\_sochi\\_i\\_krym\\_zaignayut/](http://www.bsn.ru/news/interesting/russia/38044_sochi_i_krym_zaignayut/) (дата обращения: 02.07.2014).

26. Калинина Л.Е. Государственная политика в сфере туризма: туристско-рекреационные особые экономические зоны // Туризм: право и экономика. 2006. № 5. С. 23–27.

27. Максимов Д.В., Миненкова В.В., Чамоков Д.М., Макарем И.Ф. Игорная зона «Азов-Сити»: приоритеты выбора местоположения // Курортно-рекреационный комплекс в системе регионального развития: инновационные подходы: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2014. С. 76–80.

#### References

1. Tereshchenko A.V. (2016). Comparative analysis of entrepreneurial activity of the gambling zone “Primorye” and other gambling zones of the world. *Mezhdunar. zhurn. prikl. i fund. issledovaniy*, No. 7, pp. 307-311. (in Russian).

2. The gambling market. *Ksilon bikes*. Available at: <http://www.xylonbikes.com/news/rynok-azartnyh-igr-23-01-12.html> (accessed December 2, 2019). (in Russian).

3. Maksimov D.V., Belikov M.Yu., Ryaboshapko P.V., Zelensky A.A. (2009). New zone “Azov-City”. *Geographical studies in Krasnodar Region*. Collection of Scientific Articles. Krasnodar, Kuban State University Press, iss. 4, pp. 228-229. (in Russian).

4. Vice-Governor Zolina: On-site “Azov-City” can build cadet corps. *9TB*. Available at: <http://9tv.ru/news/item/42939> (accessed October 23, 2014). (in Russian).

5. Getmantsev D. Gambling market: required. *ZN, UA*. Available at: [https://zn.ua/ECONOMICS/rynok\\_azartnyh\\_igr\\_trebuetsya\\_organizatsiya.html](https://zn.ua/ECONOMICS/rynok_azartnyh_igr_trebuetsya_organizatsiya.html) (accessed December 2, 2015). (in Russian).

6. The State Duma has given the “green light” gambling zone in Sochi. *RBC*. Available at: <http://top.rbc.ru/politics/04/07/2014/934453.shtml> (accessed December 2, 2015). (in Russian).

7. Gambling in the Crimea, to replenish the treasury. *Iteranet IT*. Available at: <http://iteranet.ru/it-novosti/2014/03/31/igornyj-biznes-v-krymu-dlya-popolneniya-kazny/> (accessed June 12, 2014). (in Russian).

8. Maksimov D. V., Evstafiev A. I., Chamokov D. M. (2014). Economic geographical analysis of the conceptual alternatives for the development of gambling zones in the Krasnodar region. *Izv. Saratovskogo un-ta. Ekonomika*.

*Upravlenie. Pravo*, No. 2-2 (14), pp. 393-401. (in Russian).

9. The first casino in the Altai gambling zone “Siberian Coin” will open in April. *NO “Association for the development of the gambling zone of Azov-City”*. Available at: <http://www.azov-city-gr.ru/ru/new/4332/> (accessed March 2, 2016). (in Russian).

10. On Amendments to the Federal Law “On State Regulation of the Organization and Conduct of Gambling and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation”: Federal Law No. 278-FZ of July 22, 2014. *Official Internet portal of legal information*. Available at: <http://pravo.gov.ru:8080/Document/View/0001201407230001?index=4&rangeSize=1> (accessed December 31, 2020). (in Russian).

11. On State regulation of gambling activities and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation: Federal Law of the Russian Federation No. 244-FZ of December 29, 2006 (as amended on July 23, 2013). *SPS “Consultant Plus”*. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64924/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64924/) (accessed January 25, 2021). (in Russian).

12. On State regulation of gambling activities and on Amendments to Certain Legislative Acts: Federal Law No. 211-FZ of July 24, 2009. *SPS “Consultant Plus”*. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64924/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64924/) (accessed January 25, 2021). (in Russian).

13. On special economic zones in the Russian Federation: Federal Law of the Russian Federation No. 116-FZ of July 22, 2005. *SPS “Consultant Plus”*. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_54599/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_54599/) (accessed January 25, 2021). (in Russian).

14. On the procedure for managing the gambling zone on the territory of the Shcherbinovsky district of the Krasnodar Territory and the Azov District of the Rostov Region and the interaction of the executive authorities of the Rostov Region and the Krasnodar Territory in the implementation of state regulation of the organization and conduct of gambling: Agreement of January 30, 2007. *SPS “Consultant Plus”*. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_89870/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_89870/) (accessed January 25, 2021). (in Russian).

15. World gambling market. *Lazy-Z.com - developer of casino gambling software*. Available at: <http://www.lazy-z.com/rus/article/articles.php?id=336> (accessed April 3, 2020). (in Russian).

16. Project “Golden Sands”. *City information portal of the resort city of Anapa*. Available at: <http://www.anapa.info/sobitiya/proekt-zolotie-peski/> (accessed June 16, 2013). (in Russian).

17. Bystrova T. (2014). Sochi: new city - new opportunities. *Kurortnyi Olimp*, November 24, pp. 6-9. (in Russian).

18. There will be new casinos in “Azov-City”. *Vedomosti*. Available at: <http://www.vedomosti.ru/newspaper/article/472711/> (accessed January 31, 2015). (in Russian).

19. In the budget of the Kuban for 2011 does not provide for the transfer of “Azov-City”. *Yuga.ru*. Available at: <http://www.yuga.ru/news/206883/> (accessed January 31, 2015). (in Russian).

20. The authorities of Kuban and investors will continue to develop the “Azov-City” in the same place. *Yuga.ru*. Available at: <http://www.yuga.ru/news/298565/> (accessed June 14, 2013). (in Russian).

21. The boundaries of the gambling zone “Azov-City” are shifting towards Anapa. *Yuga.ru*. Available at: <http://www.yuga.ru/news/256214/> (accessed April 2, 2014). (in Russian).

22. The gambling zone will be in Sochi. *Pronedra*. Available at: <http://pronedra.ru/politics/2014/05/31/igor-naya-zona-sochi/> (accessed June 12, 2014). (in Russian).

23. The Internet gambling market in the world has exceeded \$387 billion. *Financial Review*. Available at: <http://www.finobzor.com.ua/novosti/nid/5111> (accessed February 2, 2020). (in Russian).

24. Forest-covered hills. *Vedomosti*. Available at: [http://www.vedomosti.ru/img/newslines/2012/09/21/4206051\\_news\\_pic1.GIF](http://www.vedomosti.ru/img/newslines/2012/09/21/4206051_news_pic1.GIF) (accessed April 2, 2015). (in Russian).

25. Sochi and Crimea will play. *BSN*. Available at: [http://www.bsn.ru/news/interesting/russia/38044\\_sochi\\_i\\_krym\\_zagravit/](http://www.bsn.ru/news/interesting/russia/38044_sochi_i_krym_zagravit/) (accessed July 2, 2014). (in Russian).

26. Kalinina L. E. (2006). State policy in the field of tourism: turistsko-rekreatsionnye osobnye ekonomicheskie zona. *Turizm: pravo i ekonomika*, No. 5, pp. 23-27. (in Russian).

27. Maksimov D.V., Minenkova V.V., Chamokov D.M., Makarem I.F. (2014). Gambling zone “Azov-City”: priorities of location selection. *Resort and recreation complex in the system of regional development: innovative approaches*. Materials of the II International Scientific and Practical Conference. Krasnodar, Kuban State University Press, pp. 76-80. (in Russian).

УДК 504.433:622(420.61)

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-81-87

## ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В ЗОНАХ ДИЗЬЮНКТИВНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА)

© 2021 г. Г.Ю. Складенко<sup>1</sup>, В.Е. Закруткин<sup>1</sup>, Е.В. Гибков<sup>1</sup><sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

## PECULIARITIES OF INTERACTION OF UNDERGROUND AND SURFACE WATER IN ZONES OF DISJUNCTIVE TECTONIC FAULTS (ON THE EXAMPLE OF EASTERN DONBASS)

G.Yu. Sklyarenko<sup>1</sup>, V.E. Zakrutkin<sup>1</sup>, E.V. Gibkov<sup>1</sup><sup>1</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Складенко Григорий Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: gysklyarenko@srfedu.ru

Grigory Yu. Sklyarenko - Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: gysklyarenko@srfedu.ru

Закруткин Владимир Евгеньевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: vezak@list.ru

Vladimir E. Zakrutkin - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vezak@list.ru

Гибков Евгений Викторович – кандидат географических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 40, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: irvict@mail.ru

Eugeny V. Gibkov - Candidate of Geography, Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irvict@mail.ru

Восточный Донбасс, где на протяжении более столетия добывается уголь, стал природно-техногенной системой (ПТС), затрагивающей все компоненты природной среды. Среди наиболее пострадавших её элементов находятся подземные и поверхностные воды, подвергающиеся воздействию шахтных вод. Состояние ПТС обусловлено взаимодействием техногенных и природных факторов, таких как геологическое строение территории. На протяжении многих лет при экологической оценке учитывались организованные сбросы шахтных вод. В то же время этот регион характеризуется широким развитием дизъюнктивных тектонических нарушений. Логичной выглядит гипотеза, что не только очистные сооружения закрытых угледобывающих предприятий, а разломы и связанные с ними зоны трещиноватости являются каналами дренажа шахтных вод и глубинных высокоминерализованных растворов к поверхности, где происходит их разгрузка в речную сеть. Исследования, проведенные на одном из перспективных участков, на котором происходит дренаж подземных вод по трещиноватым горным породам, развитым вдоль сместителя разрывного нарушения, показали существенное их влияние на состав поверхностных вод р. Малый Несветай. Принимая во внимание очень сложную тектонику Восточного Донбасса, логичным будет предположить аналогичное влияние других многочисленных дизъюнктивных структур. Их изучение будет способствовать комплексной оценке окружающей среды региона, принятию управленческих решений, разработке действенных мер по очистке вод и стабилизации экологической и социальной ситуации в регионе.

**Ключевые слова:** Восточный Донбасс, природно-техногенная система, подземные и шахтные воды, поверхностные воды, взаимодействие, реки, тектонические разломы, влияние на окружающую среду.

*Eastern Donbass, where coal has been mined for over a century, has become a natural-technogenic system (NTS), affecting all components of the natural environment. Among the elements most affected by it are groundwater and surface water exposed to mine waters. The state of the NTS is due to the interaction of technogenic and natural factors such as the geological structure of the territory. For many years, the environmental assessment has taken into account the organized discharge of mine water. At the same time, this region is characterized by widespread development of disjunctive tectonic faults. The hypothesis seems logical that not only the treatment facilities of closed coal mining enterprises, but the faults and associated fracture zones are channels for the drainage of mine water and deep highly mineralized solutions to the surface, where they are unloaded into the river network. Studies carried out in one of the promising areas, where drainage of groundwater takes place through fractured rocks developed along the fault displacement fault, showed their significant impact on the composition of the surface waters of the river Small Nesvetay. Taking into account the very complex tectonics of the Eastern Donbass, it would be logical to assume a similar influence of other numerous disjunctive structures. Their study will contribute to a comprehensive assessment of the region's environment and the adoption of management decisions, and the development of effective measures for water purification and stabilization of the ecological and social situation in the region.*

**Keywords:** Eastern Donbass, natural-technogenic system, underground and mine water, surface water, interaction, rivers, tectonic faults, environmental impact.

### Введение

Длительная угледобыча в Восточном Донбассе (Ростовская область, РФ) привела к серьезным нарушениям состояния окружающей среды. Особенно острое воздействие проявилось в загрязнении высокоминерализованными техногенными шахтными водами подземных и поверхностных вод. Вскрытые горными выработками породные массивы активно окислялись, а подземные воды, подтапливающие шахты, будучи изначально высокоминерализованными, еще больше насыщались продуктами выщелачивания сульфидов и других минералов и становились экстремально грязными. В пределах шахтных полей и вокруг них сформировались техногенные гидрогеохимические ореолы, которые характеризовались повышенными концентрациями сульфатов, железа, марганца, кадмия, стронция и др. [1].

Обводнение угольных шахт в ходе их функционирования решалось откачкой и сливом воды через промежуточные отстойники в русла многочисленных малых рек. Такой системы очистки было недостаточно, и в поверхностные воды региона попадало до 50 тыс. т растворенного в воде железа и других веществ [2].

Вследствие реструктуризации угольной промышленности в 1990-х гг. и закрытия большинства угольных предприятий мокрым способом (т.е. затопление непрерывно поступающими в горные выработки подземными водами) процессы загрязнения природных вод усугубились, а очистные сооружения шахт не справились с поставленной задачей [3]. Кроме того, затопление шахт привело к нарушению функционирования систем водоотведения и очистки, разработанных для действующих – «сухих» предприятий. Высокоминерализованные шахтные воды стали попадать в речную сеть путем самоизлива, причем каналами их миграции служат как техногенные (элементы горных выработок), так и природные каналы –

дизъюнктивные (разрывные) тектонические нарушения. Понимание роли тектонических нарушений в загрязнении поверхностной гидросферы региона будет способствовать разработке действенных мер по очистке вод и стабилизации экологической и социальной ситуации в регионе [4].

### Цель исследования

Техногенное воздействие является мощнейшим источником преобразования природной среды и возникновения геоэкологических проблем. Наиболее сильно оно проявляется в горнопромышленных регионах, так как природный горнопородный массив претерпевает серьезные изменения. Формирующиеся здесь природно-техногенные системы (ПТС) затрагивают не только поверхность Земли, но и ее недра, где образуются обширные пустотные пространства, зоны трещиноватости, происходит кардинальное изменение режима и химизма подземных вод. Как известно, состояние таких систем обусловлено взаимодействием техногенных и природных факторов. Одним из наиболее значимых является геологическое, в том числе тектоническое, строение, так как для горнопромышленных территорий оно обуславливает проницаемость породного массива [5]. Несмотря на существенный интерес к вопросу формирования химического состава и качества поверхностных вод, в настоящее время редки работы, в которых рассматриваются разные механизмы поступления шахтных вод в поверхностную гидросферу, в том числе обусловленные природными факторами [5, 6]. Основными источниками сбросов техногенно преобразованных вод принято считать недостаточно эффективно действующие очистные сооружения горнодобывающих предприятий, т.е. точечные источники. Учитывая площадной характер выработанного подземного пространства и сложное тектоническое строение углепромышленных территорий, логично предположить дренаж

шахтных вод в реки вдоль зон трещиноватости, связанных с разломами и миграцией загрязняющих веществ из глубинных горизонтов к поверхности. Однако роль тектонического фактора в загрязнении поверхностной гидросферы пока мало изучена [7, 8]. Планируемые исследования дадут возможность восполнить этот пробел.

Цель этого исследования – изучить роль разрывных тектонических нарушений в подземной гидродинамике и в загрязнении воды рек Восточного Донбасса техногенными шахтными водами.

Задачи:

1. Выделить перспективный для изучения участок развития дизъюнктивной тектоники в бассейне одной из малых рек.

2. Выявить гидравлическую и гидрохимическую связь подземных, шахтных и поверхностных вод на этом участке.

3. Описать схематическую модель дренажа подземных и техногенных шахтных вод в реки по трещинным зонам тектонических нарушений.

### Материалы и методы исследования

В качестве перспективного для исследований был выбран участок реки Малый Несветай, расположенный в 2,5 км южнее г. Новошахтинска и в 0,5 км севернее с. Алексеевка Ростовской области. На правом берегу реки прослеживается дизъюнктивное тектоническое нарушение сбросового типа с азимутом простирания  $85^{\circ}/265^{\circ}$ , геоморфологически выраженное в виде оврага и резкого поворота русла реки. Вдоль разлома развита зона дробления горных пород. Участок поймы, примыкающий к ней, заболочен, здесь, по-видимому, происходит разгрузка подземных вод за счет дренажа по трещиноватым породам: заметно просачивание подземных вод (рис. 1), температура которых ощутимо ниже (до  $10^{\circ}\text{C}$  в зависимости от сезона), чем у речных. Поверхностные воды изучены в четырех створах на реке Малый Несветай. Два створа (№ 1 и 2) расположены на западе и северо-западе с. Алексеевка ниже по течению реки приразломной зоны. Створ № 3 находится на излучине реки в одном километре севернее поселка. Створ № 4 расположен в 750 м выше разлома по течению реки.

Изучение подземных вод проводилось в двух мониторинговых скважинах и колодце. Мониторинговые скважины № 7 и 10 расположены в долине реки Малый Несветай (на правом берегу). Скважина № 10 находится в пределах горного отвода связанных шахт «Соколовская» – «Несветаевская» – Горького – шх. № 15 – шх. № 19, расположенных севернее на территории г. Новошахтинска.

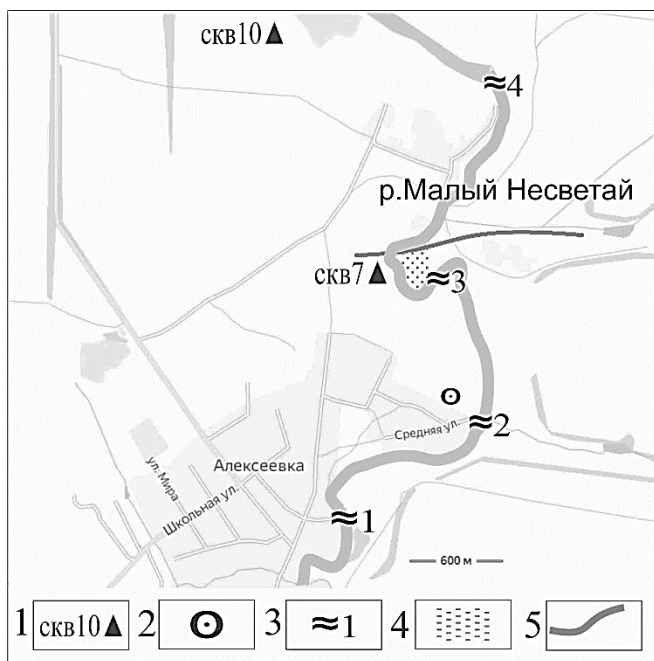


Рис. 1. План участка исследований: 1 – скважины; 2 – колодец; 3 – створы; 4 – зона подтопления; 5 – разлом / Fig. 1. Plan of the study area: 1 - wells; 2 - well; 3 - sections; 4 - flooding zone; 5 - fault

Скважина № 7 вынесена за южную границу горного отвода – в приразломную зону (рис. 2). Они обе имеют глубину 30 м, вскрывают выветрелые породы каменноугольного возраста (свит  $C_1^5$  и  $C_2^1$ ). Скважины прослеживают загрязненный поток шахтных вод, дренируемых через породный массив (скв. № 10), глубинных подземных вод, не связанных с шахтными, поступающих по развитой вдоль разлома зоне дробления пород и разбавляемых водами подземного стока по аллювиальным отложениям р. М. Несветай (скв. № 7).



Рис. 2. Приразломный участок / Fig. 2. The near-fault area

Выбор места расположения скважин осуществлен с учетом выхода рабочих угольных пластов и водоносных горизонтов в зоне влияния ликвидированных шахт и мест разгрузки шахтных вод.

Колодец, в котором производились гидроэкологические наблюдения, расположен на окраине с. Алексеевка (ул. Средняя) в 1 км южнее скв. № 7 и вскрывает зону выветривания пород свиты  $C_1^5$ , представленных преимущественно глинистыми сланцами, в меньшей степени песчаниками и редкими прослоями известняков.

Химический анализ речных и подземных вод определял рН, содержание макрокомпонентов: хлорид-, сульфат-, гидрокарбонат-ионов, железа, натрия, магния, сухого остатка и взвешенных веществ. С применением спектрального анализа в воде были определены микрокомпоненты: Al, Be, Cd, Li, Cu, Mn, Sr, Cr, Zn. Содержания их приведены в таблице.

### Результаты исследования

Макрокомпонентный состав подземных вод и минерализация в скважинах и колодце существенно отличаются. В скв. № 10 вода гидрокарбонатно-сульфатная магниевно-натриевая, сухой остаток составляет почти 7,5 г/л. Эта скважина расположена в

пределах горного отвода связанных шахт «Соколовская» – «Несветаевская» – Горького – шах. № 15 – шах. № 19. Вода демонстрирует весьма схожий с шахтными водами состав – высокую минерализацию, высокое содержание сульфат-ионов, бериллия и стронция (таблица). Состав воды, вероятно, сформировался в результате медленной фильтрации шахтных вод сквозь малопористый горнопородный массив [7, 8].

В скв. № 7 – вода гидрокарбонатно-хлоридная натриевая со значительно меньшей минерализацией (2,1 г/л), чем в скв. № 10 (таблица). Это вполне ожидаемо – скважина расположена на берегу Малого Несветая и подземные воды разбавляются стоком реки. Преобладание хлоридов и железа характерно в Восточном Донбассе для глубоких водоносных горизонтов [1, 2]. Их приток в приповерхностный горизонт происходит по приразломной трещиноватой зоне.

Химический состав воды в колодце мы можем принять за промежуточный между скважинами: он удален и от шахтного поля, и от разрывного нарушения. Среди анионов преобладают сульфат-ионы, а хлорид- и гидрокарбонат-ионы показывают средние значения между описанными выше в скважинах. Незначительно также содержание катионов – железа, марганца – главных продуктов шахтных вод и микрокомпонентов, характерных для них – бериллия и хрома.

Особенности химического состава поверхностных и подземных вод, мг/дм<sup>3</sup>  
/ Features of the chemical composition of surface and groundwater, mg/dm<sup>3</sup>

Показатель	Створ № 4	Створ № 3	Створ № 2	Створ № 1	Сква. № 7	Сква. № 10	Колодец
рН	7,2	8,32	8,31	8,28	7,94	7,46	7,65
Хлорид-ион	176,9	255,5	235,9	216,2	803,7	196,1	353,8
Сульфат-ион	1616	1788	1518	1543	167,2	4650	1029
Гидрокарбонат-ион	421,3	458	461	439,6	378,2	542,9	427,4
Сухой остаток	3640	3720	3660	3640	2100	7476	2660
Взвешенные вещества	3,2	4,8	20	28	20,4	4	<1
Железо	0,83	0,21	0,15	0,11	10,67	0,19	<0,05
Натрий	568,1	697,4	643	597,6	298,6	339,8	304,2
Магний	170,9	174,5	159,5	146,4	60,8	334,4	103
Алюминий	0,03	0,1	0,15	0,22	0,07	0,03	0,03
Бериллий	–	0,0001	–	–	0,001	0,0008	–
Кадмий	–	0,0002	–	–	0,0019	–	0,0003
Литий	0,21	0,25	0,23	0,2	0,03	0,03	0,04
Медь	0,002	0,004	0,002	0,002	0,02	–	0,004
Марганец	0,232	0,243	0,211	0,2	0,409	0,247	0,001
Стронций	5,62	6,12	5,56	5,07	0,306	3,85	4,85
Хром	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,005	0,001
Цинк	–	0,013	0,01	0,009	0,186	0,197	0,053

Минерализация невысока (2,66 г/л) и похожа на таковую в скв. № 7 – колодец также гидродинамически связан с рекой (таблица).

Речная вода во всех четырех изученных на данном участке створах имеет выдержанный гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-натриевый состав, минерализация её изменяется незначительно (3,64–3,72 г/л). Содержания микрокомпонентов в пробах, отобранных на разных створах, также близки (таблица). Однако закономерные изменения содержания некоторых элементов доказывают её разбавление глубинными подземными водами по зоне трещиноватости: в створе № 3 заметно повышенное содержание хлоридов, железа, марганца, стронция, цинка, меди, лития, никеля, бериллия и кадмия, превышающее таковое в створе № 4, расположенном выше по течению реки и закономерно убывающее в створах № 2 и 1, расположенных ниже. Уменьшение содержания этих элементов связано с двумя факторами. Во-первых, происходит окисление и выпадение в осадок интенсивно мигрировавших в анаэробной среде подземных вод ионов металлов – на поверхности формируется кислородный геохимический барьер и поллютанты насыщают донные отложения [9]. Во-вторых, речная вода разбавляется за счет выпадающих осадков и мелких притоков, это заметно по поведению хлоридов и натрия, содержание которых убывает, несмотря на высокую их растворимость. Рост содержания алюминия при удалении от зоны дренажа подземных вод, по-видимому, происходит посредством вторичного загрязнения за счет его окисления в глинистых донных отложениях, так как в аэрированных растворах с большой концентрацией хлорид-ионов значения потенциала коррозии алюминия находятся в пределах области активного растворения металла [10].

Таким образом, мы можем представить схематическую модель взаимодействия подземных, поверхностных и шахтных вод на вышеописанном участке. Как показали наши предыдущие исследования [4, 11], состав воды Малого Несветая выше створа № 4 в значительной мере формируется за счет излива шахтных вод многочисленных закрытых шахт города Новошахтинска и существенно отличается от фонового у истока реки. В зоне разрывного нарушения по трещиноватым породам на поверхность дренируются подземные воды, опробованные в скв. № 7, гидрокарбонатно-хлоридный натриевый состав которых характерен для глубинных водоносных горизонтов. Он резко отличается от более минерализованных гидрокарбонатно-сульфатных магниевых вод скв. № 10, типичных для приповерхностных водных коллекторов Восточного Донбасса. При изливе глубинных вод в заболоченной

части русла, примыкающей к разлому, и смешивании их с речными водами (створ № 3) последние обогащаются хлорид-ионом и катионами железа, марганца, стронция, цинка, меди, лития, никеля, бериллия и кадмия, интенсивно мигрировавшими в анаэробных условиях. Ниже по течению реки в створах № 2 и 1 содержание вышеперечисленных элементов в воде значительно снижается за счет их окисления и выпадения в осадок, формирующий донные отложения. В свою очередь, ранее сформированные донные отложения глинистого состава служат источником вторичного загрязнения речной воды катионами алюминия, окисление которого усиливается за счет притока глубинных хлоридных вод по трещинной зоне вдоль тектонического нарушения.

### Выводы

Формирование химического состава речной воды связано с природными условиями, а техногенные факторы обуславливают особенности и степень ее загрязненности. Наиболее остро проблема техногенного загрязнения проявляется в горнопромышленных территориях, одной из них является Восточный Донбасс. Формирующиеся здесь ПТС затрагивают не только поверхность Земли, но и компоненты геологической среды: почвы, горные породы, подземные воды. Состояние таких систем обусловлено взаимодействием техногенных и природных факторов, таких как геологическое (тектоническое) строение территории. Природная пористость и трещиноватость водовмещающих пород обычно обуславливают проницаемость породного массива и миграцию загрязняющих веществ в нем. Как показали предыдущие наши исследования, на территории Восточного Донбасса терригенные и карбонатные породы, слагающие угленосную толщу, слабопроницаемы. В то же время этот регион характеризуется широким развитием дизъюнктивных тектонических нарушений. Логичной выглядит гипотеза, что не только очистные сооружения закрытых угледобывающих предприятий, но и разломы и связанные с ними зоны трещиноватости являются каналами дренажа шахтных вод и глубинных высокоминерализованных растворов к поверхности, где происходит их разгрузка в речную сеть. Исследования, проведенные на одном из перспективных участков, на котором происходит дренаж подземных вод по трещиноватым горным породам, развитым вдоль сместителя разрывного нарушения, показали существенное их влияние на состав поверхностных вод р. Малый Несветай. Принимая во внимание очень сложную тектонику Восточного Донбасса [12], ло-

гичным будет предположить аналогичное влияние других многочисленных дизъюнктивных структур. Их изучение будет способствовать комплексной оценке окружающей среды региона, принятию управленческих решений, разработке действенных мер по очистке вод и стабилизации экологической и социальной ситуации в регионе.

### Литература

1. Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 170 с.

2. Гавришин А.И. Шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на состав подземных и поверхностных вод региона // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 5. С. 555–565.

3. Sklyarenko G., Zakrutkin V. The nature of the change in technogenic contamination of the underground water of the Eastern Donbass (Russia) // 17<sup>th</sup> Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Water Resources. Forest Marine and Ocean Ecosystems. 2017. P. 711–716.

4. Склярченко Г.Ю., Закруткин В.Е. Подземные воды Ростовской области: факторы загрязнения и оценка качества // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4. С. 98–103.

5. Мохов А.В. Управление потоками шахтных вод как один из путей оздоровления рек Восточного Донбасса // Науч. проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. М., 2019. С. 524–528.

6. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Склярченко Г.Ю., Решетняк О.С. Сравнительная оценка качества поверхностных и подземных вод Восточного Донбасса по гидрохимическим показателям // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 2. С. 91–99.

7. Склярченко Г.Ю., Родина А.О. Роль дизъюнктивной тектоники в загрязнении природных вод Восточного Донбасса техногенными шахтными водами // Проблемы социально-экономической географии и природопользования: материалы Всерос. науч. конф. Ростов н/Д., 2017. С. 269–273.

8. Фоменко Н.Е., Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Гапонов Д.А. Мониторинг динамики подземных вод в Восточном Донбассе по результатам скважинной электроразведки // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 4 (192). С. 110–119.

9. Акользин А.П., Жуков А.П. Кислородная коррозия оборудования химических производств. М.: Химия, 1985. 240 с.

10. Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Бакаева Е.Н. Гидроэкологические особенности поверхностных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса

// Изв. Российской АН. Сер. геогр. 2020. № 3. С. 451–460.

11. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк О.С., Решетняк В.Н. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса // Изв. Российской АН. Сер. геогр. 2020. № 2. С. 259–271.

12. Грановский А.Г., Грановская Н.В. Тектоническое строение, история развития и полезные ископаемые области сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты (Ростовская область). Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. 124 с.

### References

1. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. (2016). *Surface and underground waters within technogenically disturbed geosystems of Eastern Donbass: formation of chemical composition and quality assessment*. Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 170 p. (in Russian).

2. Gavrishin A.I. (2018). Mine waters of the Eastern Donbass and their influence on the composition of groundwater and surface waters in the region. *Vodnye resursy*, vol. 45, No. 5, pp. 555-565. (in Russian).

3. Sklyarenko G., Zakrutkin V. (2017). The nature of change in technogenic contamination of the underground water of the Eastern Donbass (Russia). *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Water Resources. Forest Marine and Ocean Ecosystems*, pp. 711-716.

4. Sklyarenko G.Yu., Zakrutkin V.E. (2019). Underground waters of the Rostov region: pollution factors and quality assessment. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 4, pp. 98-103. (in Russian).

5. Mokhov A.V. (2019). Mine water flow management as one of the ways to improve the rivers of the Eastern Donbass. *Scientific problems of Russian rivers recovery and ways to solve them*. Moscow, pp. 524-528. (in Russian).

6. Zakrutkin, V.E., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S. (2016). Comparative assessment of the quality of surface and ground waters of the Eastern Donbass by hydrochemical indicators. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 2, pp. 91-99. (in Russian).

7. Sklyarenko G.Yu., Rodina A.O. (2017). The role of disjunctive tectonics in the pollution of natural waters of the Eastern Donbass by technogenic mine waters. *Problems of socio-economic geography and nature management*. Materials of the All-Russian Scientific Conference. Rostov-on-Don, pp. 269-273. (in Russian).

8. Fomenko N.E., Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Gaponov D.A. (2016). Monitoring of the dynamics of groundwater in the Eastern Donbass based on the results of borehole electrical exploration. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 4 (192), pp. 110-119. (in Russian).
9. Akolzin A.P., Zhukov A.P. (1985). *Oxygen corrosion of chemical production equipment*. Moscow, Khimiya Publ., 240 p. (in Russian).
10. Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S., Bakaeva E.N. (2020). Hydroecological features of the surface waters of the coal-mining territories of the Eastern Donbass. *Izv. Rossiiskoi AN. Ser. geogr.*, No. 3, pp. 451-460. (in Russian).
11. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S., Reshetnyak V.N. (2020). Bottom sediments as an indicator of primary and a source of secondary pollution of river waters of the coal-mining territories of the Eastern Donbass. *Izv. Rossiiskoi AN. Ser. geogr.*, No. 2, pp. 259-271. (in Russian).
12. Granovskiy A.G., Granovskaya N.V. (2020). *Tectonic structure, history of development and minerals of the junction area of the East European platform and the Scythian plate (Rostov region)*. Rostov-on-Don, Taganrog, Southern Federal University Press, 124 p. (in Russian).

---

*Поступила в редакцию / Received*

*30 марта 2021 г. / March 30, 2021*

УДК 553.3/4

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-88-98

## GEOCHEMICAL FEATURES OF THE DISTRIBUTION OF ORE ELEMENTS IN THE POLYMETAL ORES OF MEHMANIAN DEPOSIT (AZERBAIJAN PART OF THE LESSER CAUCASUS)

© 2021 г. *M.I. Mansurov<sup>1</sup>, B.H. Galandarov<sup>1</sup>, M.H. Safari<sup>2</sup>, V.M. Karimov<sup>3</sup>, U.I. Karimli<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Baku State University, Baku, Azerbaijan,*

<sup>2</sup>*Payami Nur University, Tehran, Iran,*

<sup>3</sup>*Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan*

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУДАХ МЕХМАНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ ЧАСТЬ МАЛОГО КАВКАЗА)

*М.И. Мансуров<sup>1</sup>, Б.Г. Каландаров<sup>1</sup>, М.Г. Сафари<sup>2</sup>, В.М. Керимов<sup>3</sup>, У.И. Керимли<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан,*

<sup>2</sup>*Университет Пайме Нур, Тегеран, Иран,*

<sup>3</sup>*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан*

*Mamoy I. Mansurov - Associate Professor, Department of Minerals Geology, Geological Faculty, Baku State University, Z. Halilova St., 23, Baku, AZ 1148, Azerbaijan, e-mail: mamoy\_mansurov@mail.ru*

*Мансуров Мамой Ибрагим оглы – доцент, кафедра полезных ископаемых, геологический факультет, Бакинский государственный университет, ул. З. Халилова, 23, г. Баку, AZ 1148, Азербайджан, e-mail: mamoy\_mansurov@mail.ru*

*Bahadur H. Galandarov - Professor, Department of Minerals Geology, Geological Faculty, Baku State University, Z. Halilova St., 23, Baku, AZ 1148, Azerbaijan*

*Каландаров Багадур Гасан оглы – профессор, кафедра полезных ископаемых, геологический факультет, Бакинский государственный университет, ул. З. Халилова, 23, г. Баку, AZ 1148, Азербайджан*

*Mehti H. Safari - Associate Professor, Department of Minerals Geology, Geological Faculty, Payami Nur University, Artesh St., Tehran, P.O. 19395-3697, Republic of Iran, e-mail: mb.safari@yahoo.com*

*Сафари Мехти Гаджи – доцент, кафедра полезных ископаемых, геологический факультет, Университет Пайме Нур, ул. Арташ, г. Тегеран, П.О. 19395-3697, Республика Иран, e-mail: mb.safari@yahoo.com*

*Vagif M. Karimov - Associate Professor, Department of General Geology, Geological Faculty, Azerbaijan State Oil and Industry University, Azadlig St. 20, Baku, AZ 1010, e-mail: vaqifkerimov68@mail.ru*

*Керимов Вагиф Мирзамехти оглы – доцент, кафедра общей геологии, геологический факультет, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, ул. Азадлыг, 20, г. Баку, AZ 1010, Азербайджан, e-mail: vaqifkerimov68@mail.ru*

*Ulker I. Karimli - Associate Professor, Department of Minerals Geology, Geological Faculty, Baku State University, Z. Halilova St., 23, Baku, AZ 1148, Azerbaijan, e-mail: ulkerkerimli76@mail.ru*

*Керимли Улькер Ибрагим кызы – доцент, кафедра полезных ископаемых, геологический факультет, Бакинский государственный университет, ул. З. Халилова, 23, г. Баку, AZ 1148, Азербайджан, e-mail: ulkerkerimli76@mail.ru*

*By using the results of geochemical research methods, the geochemical features of distribution of basic ore elements in Mehmanian polymetal deposit ores have been considered in the article. The definition features of main ore elements were given, close positive and negative relations between elements pairs were defined by correlation analysis according to the selected elements. On the basis of analysis of current analytical information results complexity has been studied, geochemical condition of localization of productive sulphide mineralization in the generation stage of ore formation has been analyzed. Behaviour features of elements have been investigated, the interaction between them has been clarified and based on their statistical analysis of geochemical features of the deposit has been made. The dependence features of one ore element from the other were determined in various types of ores of the deposit.*

**Keywords:** *Mehmana, polymetal deposits, structural-morphological, sulphide mineralization, ore elements, geochemical, correlation, statistical analysis.*

*Рассмотрены геохимические особенности распространения основных рудных элементов в рудах Мехманинского полиметаллического месторождения с использованием результатов геохимических методов исследования. Даны характеристики определения основных рудных элементов, определены тесные положительные и отрицательные отношения между парами элементов путем корреляционного анализа по выбранным элементам. На основе анализа результатов аналитической данных изучена многокомпонентность полиметаллических оруденений, проанализированы геохимические условия локализации продуктивного сульфидного оруденения в стадии рудообразования. Исследованы особенности поведения элементов, выяснено взаимодействие между ними и на их основе проведен статистический анализ геохимических особенностей месторождения. Установлены особенности зависимости основных рудных элементов одного от другого в различных типах руд месторождения. Проведенное исследование имеет практическое значение для региональных и локальных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки полиметаллических месторождений.*

**Ключевые слова:** Мехмана, полиметаллические месторождения, структурно-морфологические, сульфидное оруденения, рудные элементы, геохимический, корреляция, статистическая анализ.

## Introduction

Mehmanian specific polymetal deposit is compatible to the intersection junction of Delidag-Mehmanian uplift with Agdam anticlinorium in the south-west of Lok-Agdam mature islands-arc within structurally cognominal ore field (Fig. 1). Various types of sulphide deposits are connected within ore field spacially. In one case later sulphide mineralization occurs after copper-porphyry mineralization. In the other case, forming concentration a little aside, the latter forms vein-type polymetal mineralization of industrial importance [1-3].

Within the borders of ore field, copper-porphyry, copper-polymetal, gold-pyrite and other types of deposits and occurrences are conformed to exo and endocontact zones of Mekhmanian intrusive belonging to gabbro-diorite-grano-diorite formation appeared in the Upper-Yurassic-Lower Cretaceous ages. This intrusive massif is associated with basalt-andesite-dacite formation spacially and it forms volcano-plutonic association together with it. Intrusive massif cuts through Yurassic volcanites and afterwards it is inappropriately covered with younger Cretaceous sediments (Fig. 2) [1, 4].

The main purpose of the article is to study geochemical features of copper-porphyry mineralization by analyzing petrographic-petrological features of intrusive and surrounding rocks in Mehmana ore field. The definition features of major elements and basic ore components have been investigated, their genetic and geochemical features have been studied, and the relations between pairs of the element have been defined by the correlation analysis.

## Research methods

The samples of rocks were explored by the method of mass-spectroscopy with inductive-connected plasma (ICP-MS). Analytical researches were carried out in the analytical labs USGS Geological service of the USA (Denver). The composition of ore minerals was

defined with the help of Camebax Inca Oxford Instruments electron-zonding microanalysers.

Petrological features of the magmatic rocks of ore district were studied by up-to-date methods. Silicate chemical analysis were carried out in the labs of the faculty of Geology of the University of Izmir, Turkey. Atom-absorption analysis in the devices (appliances) of the company Perklin Elmer allowed to define series of elements quantitatively (Cu, Mo, Pb, Zn, Ni, Co, Sr, Ag, Cr and etc.). The study of microelements were conducted in Switzerland in the devices XRF at the University of Lausanne.

The results of spectral, atomic-absorption and chemical analyzes have been used during the solution of defining the problems of basic ore components of Mekhmanian deposit polymetal ores, its genetical and geochemical features. The distribution of testing points were taken equally on the boundary of the deposit. The results of testing information were used on cropping out, both natural strip-pits, mining and drilling works were used (ditches, bore pits, wells). At the same time, the geochemical analysis of testing results has been accompanied by geological-petrographical descriptions. Analytical information is analyzed by Pb, Zn, Ag, Au, Cu, S, Ni, Cd, In, Se, Mo, Te, Bi and other elements. According to the results of surrounding rocks and mineral analysis primary materials stand on the basis of the solution of the problem. The development of statistical results of geochemical information according to the obtained results have been carried out on the programs of "STATISTICS" and "MINITAB-16".

## Geological setting and deposit geology

Middle and Upper Yurassic volcanogenic rocks and sedimentary and Lower Cretaceous sedimentary and volcanogenic-sedimentary rocks participate in the geological structure of Mehmanian ore field. Fault structures play an important role in the structure of ore field. The majority of them are hidden and they have been revealed on the basis of the distantional information.

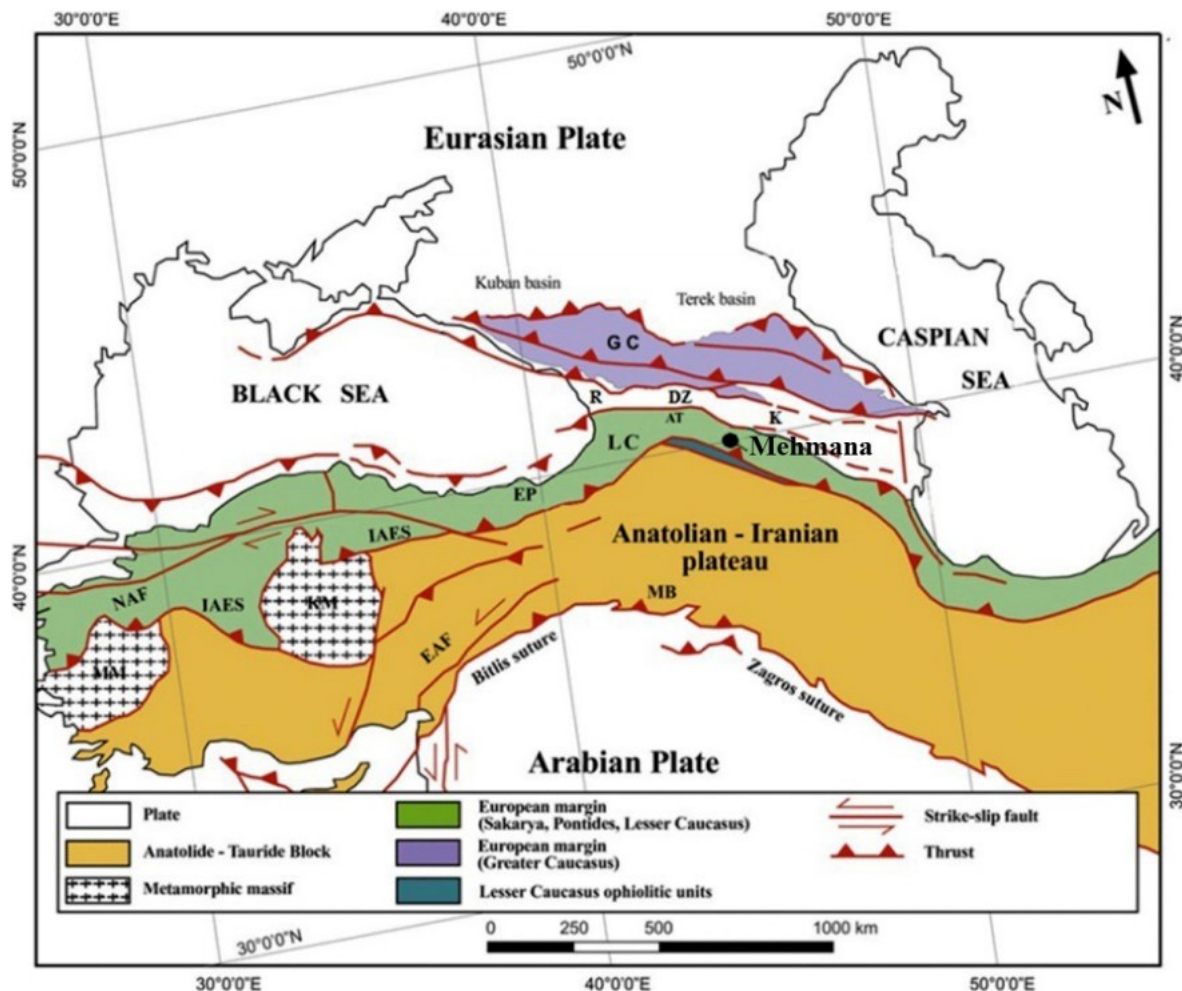


Fig. 1. Tectonic map of the Arabia-Eurasia collision zone. Location of the Mehmana deposit is shown by a filled circle (modified from Sosson et al., 2010). Abbreviations: GC - Greater Caucasus; LC - Lesser Caucasus; AT - Achara - Trialeti; R - Rioni; Dz - Dzirula; K - Kura; MB - Mus Basin; EP - Eastern Pontides; KM - Kirshehir Massif; EAF - Eastern Anatolian Fault; NAF - North Anatolian Fault; IAES - Izmir - Ankara - Erzincan Suture; MM - Mendere Massif / Рис. 1. Тектоническая карта зоны коллизии Аравия – Евразия. Местоположение месторождения Мехмана показано кружком в поле (изменено по Sosson et al., 2010). Сокращения: GC – Большой Кавказ; LC – Малый Кавказ; AT – Аджара-Триалети; R – Риони; Dz – Дзирула; K – Кура; MB – Мусский бассейн; EP – Восточные Понтиды; KM – массив Киршехир; EAF – Восточно-Анатолийский разлом; NAF – Северо-Анатолийский разлом; IAES – шов Измир-Анкара-Эрзинджан; MM – массив Мендерес

Ore controlling structures are considered striking faults in the north-west and north-east directions [5]. Gyzybulag copper-gold-pyrite and Mehmanian specific polymetal deposit, Gulyatag and Khazindag copper-pyrite manifestations, Demirli and Agdere copper-porphry deposits and occurrences and other deposits and occurrences are located along the Tartar river striking fault zone [2, 3].

According to A.D. Kerimov's ideas [2], the formation of Mehmanian intrusive has occurred in two phases. Massif-crystalline rocks forming the basis of intrusive massif refer to the first phase. Dyke-facies rocks and as well as a number of massifs-small intrusives were formed in the second phase. The Middle Jurassic rocks buried around the intrusive, mainly quartzitic, plagioclas-

tic and other porphyrites, tuffs and tuffaceous sandstones, as well as quartz diorite-porphyrates, porphyritic banatites buried in the marginal part of the intrusive were exposed to hydrothermal-metasomatic changes to a varying degree as a result of contact activity. Such changes are represented with silicification, seritization, chloritization and limonitization. Silicification covers both endocontact and exocontact rocks widely. They are turned into secondary quartzites in separate places [3, 6, 7].

Mehmanian polymetal deposit refers to vein type for its inner structure and structural-morphological features of ore-bearing mass. All the veins lie between Batian volcanogenic and volcano-sedimentary rocks which are prone to sharp dip towards the north-west and south-east directions.

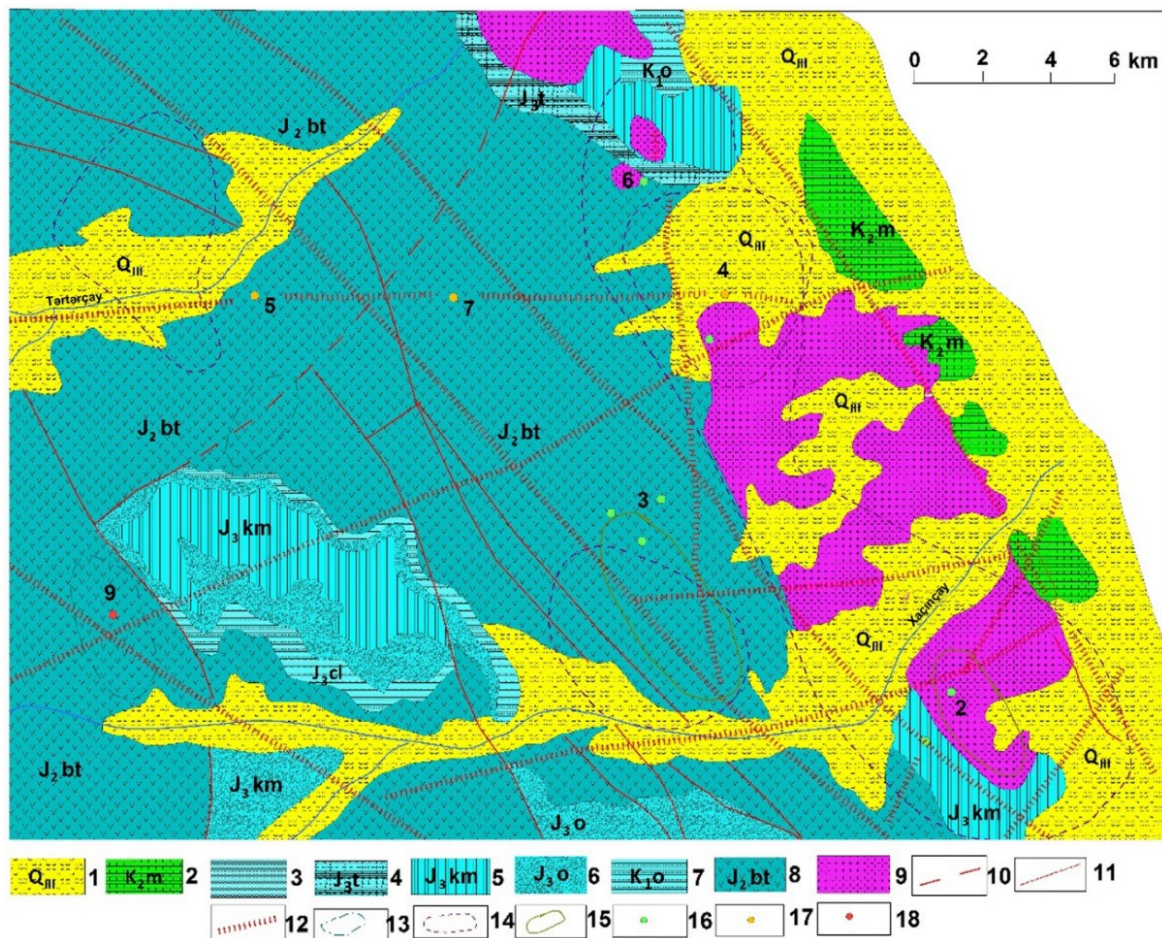


Fig. 2. Geological map of Mehmanian ore district: 1 - recent, alluvial, deluvial deposits; 2 - maastricht. Monolithic pelitomorphous limestones; 3 - albanian. Tuff sandstones, tuff breccia, marl; 4 - tithonian. Fragmental limestones; 5 - kimmeridgian. Tuff conglomerates, tuff breccias, tuff gravelstones; 6 - oxfordian. Fragmental-sandy limestones; 7 - callovian. Tuff sandstones, tuff gravelstones; 8 - bathonian. Tuff conglomerates, tuff sandstones, tuff breccias, porphyrites, quartz porphyrites; 9 - granodiorites, granodiorite-porphyrtes. Tectonic faults; 10 - known faults; 11 - assumed faults; 12 - faults marked according to complex of distance data (geophysical, aerospace). Anomalous areas: 13 - on CP; 14 - on positive anomalies of magnetic field which correspond to buried intrusive bodies of medium composition; 15 - areas with multiplicative geochemical anomalies on the secondary aureole:  $Cu \times Mo \times Ag + Pb + Zn + Co$  (more than  $500 \cdot 10^{-11} \%$  on background of  $50 \cdot 10^{-11} \%$ ). Deposits and occurrences: 16 - porphyry copper (1 - Demirli; 2 - Khachinchai; 3 - Kazanchin; 6 - Agdere); 17 - complex ores (4 - Gulyatag; 5 - Gyzybulug; 7 - Mekhmanian); 18 - copper-sulphide (8 - Khazinaadag) / Рис. 2. Геологическая карта Мехманинского рудного района: 1 – современные, аллювиальные, делювиальные отложения; 2 – маастрихт. Монолитные пелитоморфные известняки; 3 – альб. Туфопесчаники, туфобрекчии, мергели; 4 – титон. Обломочные известняки; 5 – кимеридж. Туфоконгломераты, туфобрекчии, туфогравелиты; 6 – оксфорд. Обломочно-песчанистые известняки; 7 – келловей. Туфопесчаники, туфогравелиты; 8 – бат. Туфоконгломераты, туфопесчаники, туфобрекчии, порфириды, кварцевые порфириды; 9 – гранодиориты, гранодиорит-порфиры. Тектонические нарушения; 10 – достоверные разломы; 11 – предполагаемые разломы; 12 – разломы, выделенные по комплексу дистанционных данных (геофизических, аэрокосмических). Аномальные участки: 13 – по ВП ( $Ch_k \geq 4,0 \%$  при фоне  $2,0 \%$ ); 14 – по положительным аномалиям магнитного поля, соответствующим скрытым интрузивным телам среднего состава; 15 – участки мультипликативных геохимических аномалий по вторичным ореолам:  $Cu \times Mo \times Ag + Pb + Zn + Co$  (более  $500 \cdot 10^{-11} \%$  на фоне  $50 \cdot 10^{-11} \%$ ). Месторождения и проявления: 16 – медно-порфировые (1 – Демирлинское; 2 – Хачинчайское; 3 – Казанчинское; 6 – Агдаринское); 17 – комплексных руд (4 – Гюльятаское; 5 – Гызылбулагское; 7 – Мехманинское); 18 – медноколчеданные (8 – Хазинадаское)

The thickness and shape of ore veins depend on the lithological composition of the surrounding rocks and it's observed along the whole deposit area. During the intensive hydrothermal change of rocks the selvage of veins is not observed clearly. The total amount of detected veins is nearly 30 and the majority of them are

localized in the fault structures in the direction close to width [2, 3, 8].

Though zonality is observed in separate veins, stable vertical zonality hasn't been defined here. The definition of ore elements along strikings and dippings is inequal in the veins, the shift of intervals of industrial

importance and without ore is observed in all of them. The amount of turbid ores in the tongues increases in the western end of vein and they are considered basic ore-forming minerals together with sphalerite. Quartz-galenite-sphalerite mineral association widely developed in the deposit and galenite prevails over sphalerite in quantity [9-11].

Different minerals participate in the composition of lead-zinc ores of the deposit. Galenite, sphalerite, chalcopryrite and pyrite are referred to primary ore minerals. The amount of Pb comprises 50 % in galenite, but the amount of zinc comprises 42 % in sphalerite [9]. Galenite veinlets form bunches and phenocrysts, as well as fine-grained veinlet-like and lens-like mass. Sphalerite mineralization has widely spread mainly in the eastern part of the deposit and they usually form bunches, lens-like mass and veinlets [2, 9].

Pb, Zn, Ag, Au, Cu, S, Ni, Cd, In, Se, Mo, Te, Bi and other elements participate in the content of polymetal ores. We should mention that, Au and Ag are found in many ore veins. Certain compliance is observed in definition of their amount. According to N.R. Ilyasov [12], the amount of Au is low in galenite and sphalerite and doesn't participate in their composition (it is absent in their composition) [13].

The high amount of Au is observed in the ore veins where the quantity of chalcopryrite is much. Free Au was defined in chalcopryrite-pyrite, sphalerite-chalcopryrite, specific sphalerite, magnetite-sulphide ores. It indicates that free Au participates in all stages of mineralization. In the sphalerite ores, the separation of Au is observed in the sphalerite, galenite and quartz, but in the magnetite-sulphide ore free gold is found in chalcopryrite and bornite. More correctly, paragenetic relations of this mineral with ore minerals is observed. For this reason, maximum amount of Au is compatible to the maximum concentration of copper ore. Paragenetic relations of Au with chalcopryrite and sphalerite indicates that they are found in the areas where these minerals prevail most [14-16].

The high amount of Ag is observed in the area where galenite develops much (Table 1).

Table 1

**The amount of Ag of Mehmanian deposit in galenite ores / Содержание Ag в галенитовых рудах Мехманинского месторождения**

Veins	Absolute altitude where the experiment was done (with meters)	Average amount of Ag /q/t
Lead-Sacher	838	63.3
Lead-Sacher	972	71.4
“B”	1017	154.0
	1119	219.6
Spridonov	1133	172.2

But, free Ag is found in copper-pyrite and specific sphalerite ores. A number of researchers associate the formation of free Ag with re-enrichment sulphide zone of ores [10].

The amount of Ag in pyrite chalcopryrite ores changes till 203 q/t. At the same time, its small concentration can be found in massive ores. The amount of Ag varies between 0.5-29.4 q/t intervals in chalcopryrite-sphalerite ores. Greater (higher) amount of Ag is observed in sphalerite and sphalerite-galenite ores in the eastern flang of the deposit. High amount of Ag is characteristic for other sphalerite veins. The amount of Ag in sphalerite-galenite veins is higher than specific sphalerite ores [9, 10, 12].

Au and Ag are found in most ore veins of Mehmanian deposit and their definition is inequal in the ores. The amount of Au is low in galenite and galenite-sphalerite mineral associations, sometimes it is not even found. High concentration of Au is connected with the areas where pyrite-chalcopryrite prevail [10, 17].

According to V.M. Babazade [18], Ag-Au proportion has non-linear feature. The lowest proportion (3.0:3.6 q/t) is observed in pyrite-chalcopryrite and chalcopryrite-sphalerite mineral associations, but high proportion can be found in sphalerite and sphalerite-galenite ores (21.0-110 q/t). Ag:Au proportion makes special interest and depending on the mineral composition of ores it changes towards bedding depth (depth of dip) (Table 2).

Table 2

**Ag:Au proportion in Mehmanian deposit ores / Соотношения Ag:Au в рудах Мехманинского месторождения**

Type of ore	Ag:Au
Pyrite-chalcopryrite	3.6
Chalcopryrite sphalerite	3.0
Sphalerite	21.0
Sphalerite-galenite	110.0

Au has been found in pyrite-chalcopryrite, sphalerite-chalcopryrite, specific sphalerite and magnetite-sulphide type ores. It indicates that, Au has participated in all mineral forming stages. Its close paragenetic relations with copper minerals are observed. The positive correlation relations between Au and Cu confirms it ( $r_{Au-Cu}=0.46$ ). In this case, it has negative correlation relations with Pb ( $r_{Au-Pb}=0.75$ ), Zn ( $r_{Au-Ag}=0.67$ ) and also Ag ( $r_{Au-Ag}=0.83$ ). The obtained information shows once again that high amount of Au is compatible to maximum concentration field of copper ores (Table 3) [10, 18].

The dependence of Cd is observed in sphalerite. It likely takes part in a form of isomorphic mixture here. The results of chemical analysis of various generation of sphalerite shows high amount of Cd: sphalerite I marmatite type 0.34 %, sphalerite II 0.21 %. Cd is found in pyrite (till 210 q/t), in chalcopryrite (until

350 q/t) and in galenite (till 220 q/t) [10]. It is found in sulphides, especially in sphalerite (till 2010 q/t). Sphalerite is considered main concentrate for it. According to Galandarov [10], on the analysis results of basic ore minerals (galenite, sphalerite, chalcopryrite, pyrite), major sulphide minerals are considered chalcopryrite (up to 460 q/t) and sphalerite (up to 340 q/t). The amount of Se and Te is in insignificant quantity in lead-zink ores and their definition is unequal. Relatively high amount of Bi was revealed in galenite (1.0-53.0 q/t) [19].

Table 3

**Correlation of the main and adjacent elements of the ore bed**  
/ **Корреляционная связь основных и сопутствующих элементов руд Мехманинского месторождения**

Elements	Zn	Cu	Au	Ag
Pb	0.05	-0.38	-0.75	1.0
Zn		-0.40	-0.67	0.42
Cu			0.46	-0.60
Au				-0.83

High amount of Ag is compatible to the area where galenite is accumulated. It is found among galenite veins comprising the association with non-ore minerals in a form of veinlets and bunches here.

According to [14] ideas, only a small part of silver preserved in polymetal ores of Mehmanian deposit is associated with native silver. Its significant distribution is connected with galenite and galenite-sphalerite mineralization.

According to Ilyasov [12], higher concentration of Ag belongs to sphalerite and sphalerite-galenite ores. The amount of Ag is higher in galenite in comparison with sphalerite (1.8-22.1 q/t, average 13.1 q/t in sphalerite-galenite veins). According to the mentioned factors, we can come to such a conclusion that, basic carriers of Ag are galenite and sphalerite in the polymetal ores of Mehmanian deposit. At the same time, the amount of Ag in the upper ore-carrier horizon in galenite is relatively higher than lower horizon (Table 4).

Table 4

**Change of the amount of Ag in galenite according to vertical section in Mehmanian deposit / Изменения содержания Ag в галенитах Мехманинского месторождения по вертикали**

Altitude	Quantity, q/t	
	Limit of quantity	Average
Up to 900 m	63.3-71.4	67.35
900-1100 m	71.4-219.6	148.13
1100-1130 m	154.0-219.6	181.67

Average quantity of the elements such as Au, Ag, Cu, Zn and Pb was given in the Table 5 in various ore veins according to the Mehmanian deposit. On the basis of this information, linear dependence graphics and definition histograms of basic ore elements have been set up in various types of ore. The operation was carried out by "MINITAB-16" computer program.

Table 5

**Average quantity of Au, Ag, Pb, Zn and Cu in various types of ores of the Mehmanian deposit**  
/ **Среднее содержание Au, Ag, Pb, Zn и Cu в различных типах рудах Мехманинского месторождения**

The place where	Au, q/t	Ag, q/t	Cu, %	Zn, %	Pb, %
Erchin-guney	10.6	29.1	3.7	1.37	-
Dana-guney	2.2	-	1.7	4.5	1.43
Erkatzor	2.2	-	1.74	-	0.02
Sedimentary (according to information on cave)	8.1	-	2.75	1.31	-
Sedimentary (according to surface mountain hole)	0.6	-	0.15	0.02	-
Vein 1-9	3.6	-	2.4	0.05	0.01
Vein No. 6	2.0	-	1.1	0.71	0.09
Vein No. 6a	0.5	-	0.11	0.25	0.02
Vein No. 7	0.7	-	0.36	1.08	0.03
Vein No. 5	8.4	-	1.72	1.92	0.02
Vein No.4	10.9	9.0	1.24	0.4	0.1
Venindere	1.0	-	1.0	2.73	0.2
Dmitriyev	1.5	29.4	0.05	16.7	0.76
Spridonov	0.5	32.3	0.06	3.79	3.67
Old-Monastr	0.4	14.1	0.08	7.79	0.17
Vein No. 1	1.3	-	0.03	5.23	0.34
Vein No. 2	0.6	6.9	0.3	7.44	0.33
Akritov	0.6	52.5	0.21	8.6	1.94
Lead-Sacher	0.1	17.2	0.01	2.26	5.94
"B"	0.7	74.0	0.09	2.66	8.37
Western Drombon	-	26.1	0.12	2.19	1.12

Basic ore-forming sulphides-galenite and sphalerite are characterized by low quantity of absence of gold, but chalcopyrite is characterized by considerable amount of gold. Straight correlation relations has been defined between concentration of gold and intensivity of manifestation of mineralization of chalcopyrite. Unlike gold, high concentration of gold is observed in the ore-bearing fields which preserve maximum amount of galenite and galenite-sphalerite mineralization [10, 17, 20].

### Discussions

For the solution of the issue, behavior features of chemical elements in the ores were investigated and a few point dependence graphics reflecting dependence relations between the elements were set up. In order to study the definition features of indicator elements, interactions between them were investigated and on the basis of them, statistical analysis of geochemical features of the deposit were made.

As seen from the analysis, dependence of pairs of the element is symmetrically repeated relatively to diagonal. Dependent variabilities were shown in the vertical axis of graphics, but independent variabilities (changers) were indicated in the horizontal axis of graphics.

Dependence features of one basic ore element of the deposit from the other are analyzed below. First, dependence relations of Pb and Zn elements from Cu, Ag, Au elements and at the same time dependence relations of these elements between themselves have been given. As seen from the diagram, main part of point clouds was accumulated around regression line, in the initial line, but small part of it in the margin of the line. In the dependence diagram of Pb and Zn with Ag, point clouds were accumulated along the vertical line. It is noticed in the diagonals that, there is significantly close correlation relation between these elements (Fig. 3). The distribution of points around straight regression line is more, but correlation coefficient is relatively low here.

The dependence graphics of the amount of Cu, Au and Ag from the amount of Pb and Zn are shown in the Fig. 4. At the same time, dependence graphics of these elements between themselves is shown too. Here the distribution of points are not compatible to regression line. So, the distribution of points is inequal in the right half of straight regression curve. But, here regression curve must in-

crease relatively to the current situation. Clouds of point were accumulated mainly along the regression line, particularly in the initial line with the exception of Cu-Ag dependence, in the dependence diagram of Cu from other elements [21]. The ores containing great amount of Cu and small amount of Zn are referred to oxides and they are localized near the upper part of ore mass where Cu is found [22].

In the dependence diagram of Au with other elements the situation is quite different in comparison with the others. So, there is incompatibility in the distribution of points here, clouds of point have been straightened according to the vertical section, not along the regression line.

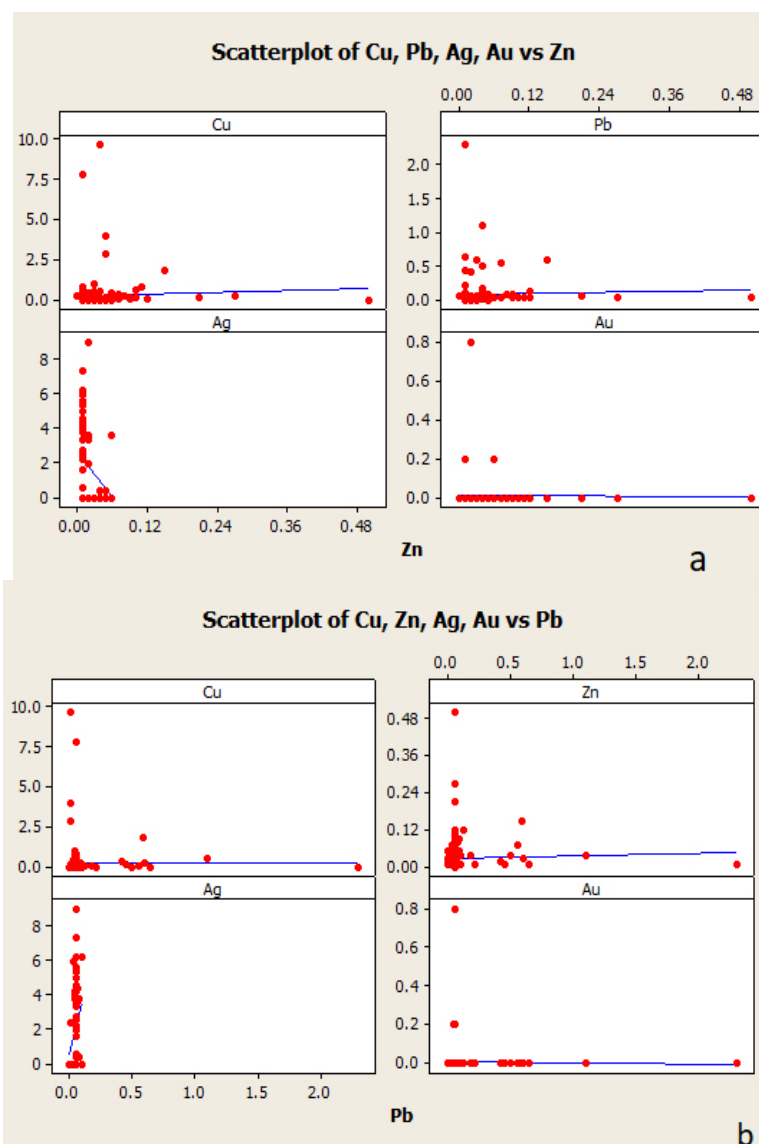


Fig. 3. Linear dependence graphics of Zn (a) and Pb (b) with other ore elements in various types of ores in the Mehmanian deposit / Рис. 3. Графики линейных зависимостей Zn (a) и Pb (b) с другими рудными элементами в различных типах руд Мехманинского месторождения

In the point dependence diagram between Ag and Zn, Pb, Cu and Au clouds of point are distributed in the margins and along the regression line equally.

In the other case, incompatibility is observed between the distribution of points and regression line in the dependence diagram between Ag and Zn and Pb like the previous diagram (Fig. 4). Two accumulation areas of point clouds are separated in each of these diagrams. Basic accumulation area of points is compatible to primary sulphide ores. One of the other two areas reflecting small amount of point is characterized by anomalous amount of Pb, the other is characterized by Zn. These two point clouds reflecting anomalous amount of Zn and Pb respond to oxide ores of the deposit.

As seen from the analysis of diagrams, the more the number of samples is, the more closely these points will be grouped. More portable collection of points respond to the samples obtained from the primary sulphides of the deposit. Collections of point extended along the vertical axis of the left side of diagram are likely production of oxide ores. According to the analysis of linear dependence diagrams between basic components (Pb, Zn, Cu, Ag, Au) in various types of ores on the Mehmanian deposit, we can note that the definition of majority of the shown chemical elements are due to positive correlation relations. It shows that all these emerged as a result of single geochemical processes. All studied samples are not homogenous and at least three mineral associations participate in polymetal ore mass: 1) primary sulphide ores; 2) oxide ores; 3) significantly enriched sulphide ores with Pb [20, 22].

Along with linear dependence between basic ore elements (Pb, Zn, Cu, Ag, Au) definition features of these elements have been considered, too. On this purpose, definition histograms of these elements were set up. As seen from these histograms, the results of samples obtained from aureoles of this deposit and mineralized rocks are reflected here. This combined feature has been reflected in the structure of histograms. More portable, symmetric and the same peaked form appeared here in the histograms set for Au and Pb, partially Cu. Normal definition curves of elements are described here well (Fig. 5).

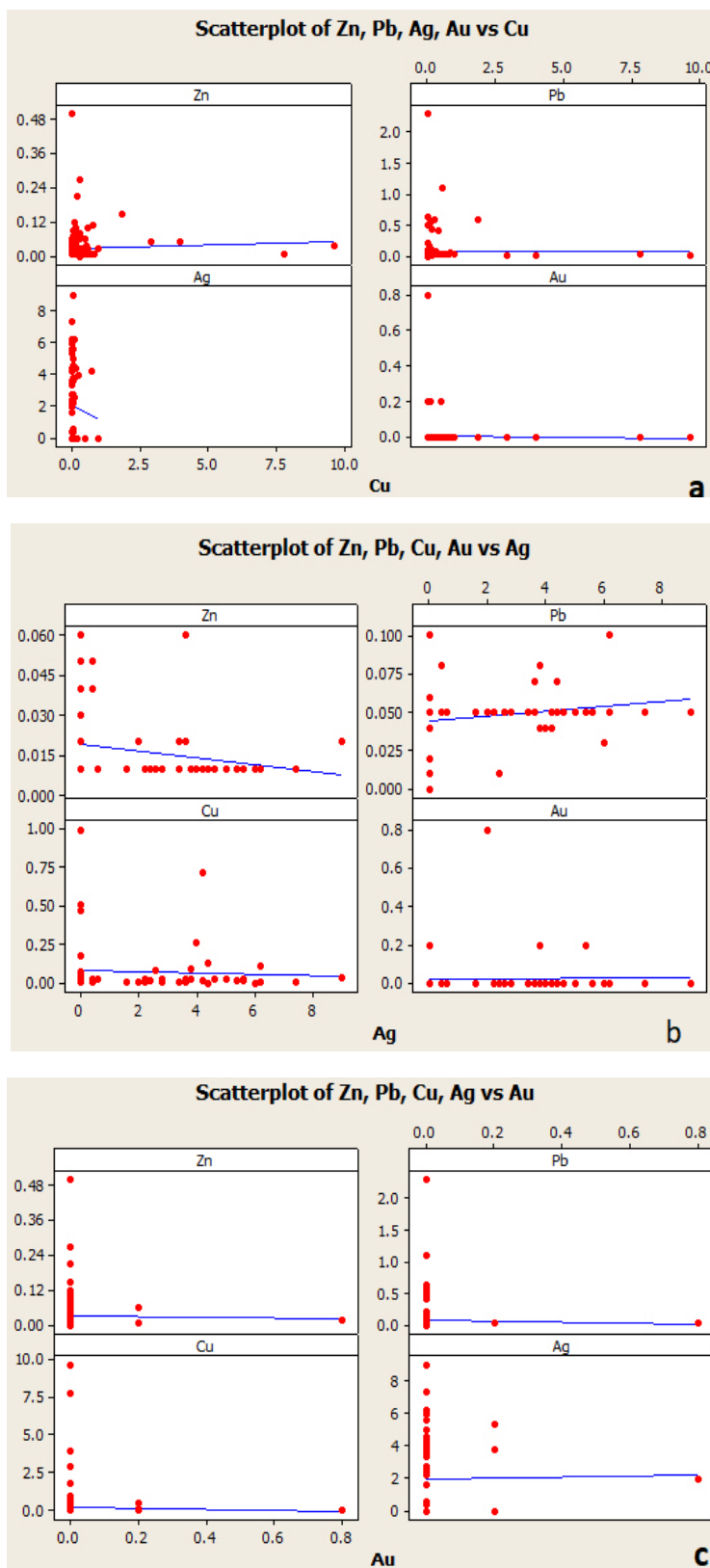


Fig. 4. Linear dependence graphics of Cu (a), Au (b) and Ag (c) with ore elements in various types of ores of the Mehmanian deposit / Рис. 4. Графики линейных зависимостей Cu (a), Au (b) и Ag (c) с другими рудными элементами в различных типах руд Мехманинского месторождения

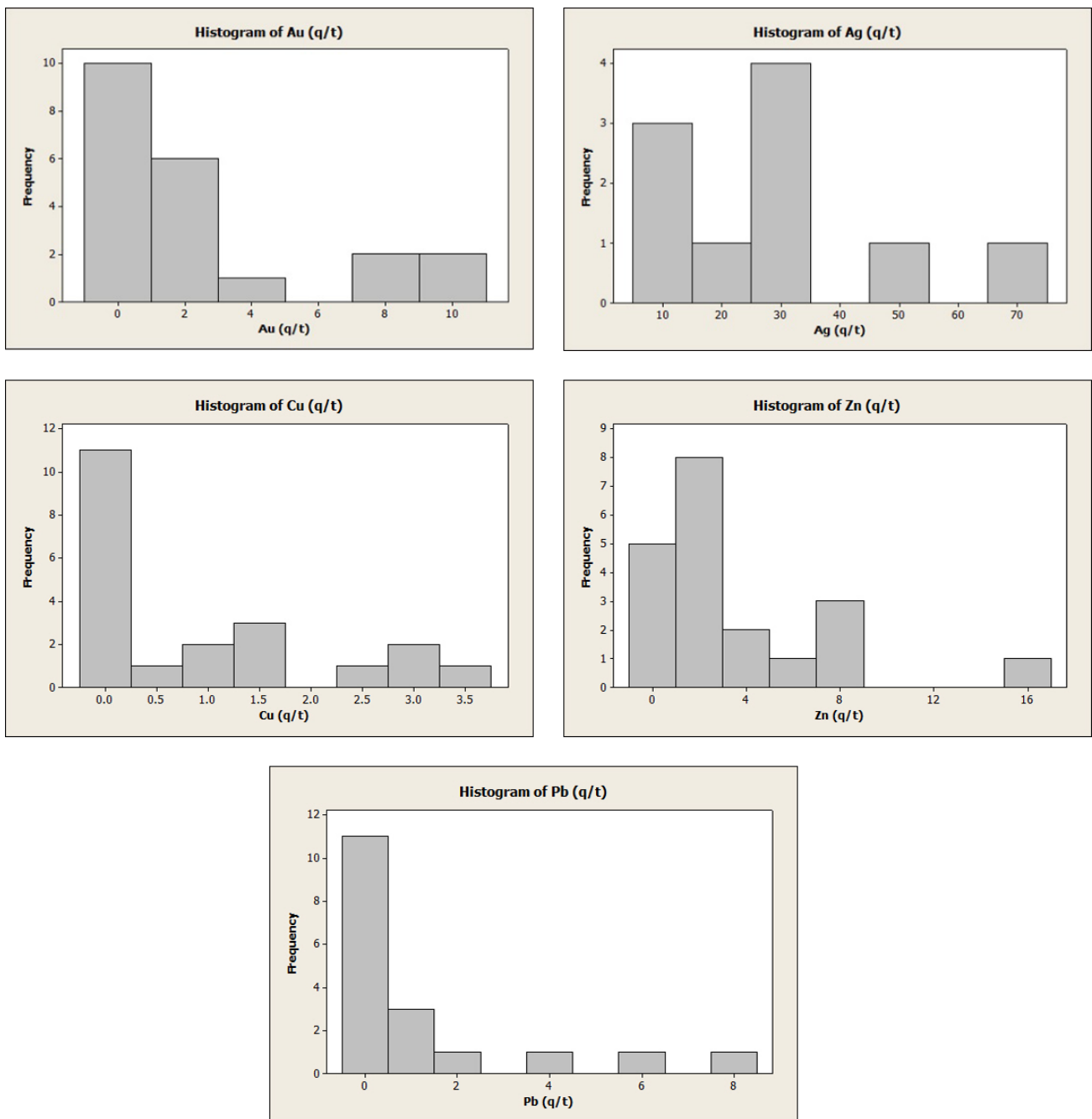


Fig. 5. Definition histograms of basic ore elements in Mehmanian polymetal deposit

/ Рис. 5. Гистограммы определения основных рудных элементов Мехманинского полиметаллического месторождения

This symmetry was broken in the histograms compiled for Ag and Zn. Definition curves are different and they possess abnormal feature.

We can come to such a conclusion that the totality of all samples reflect two definition combinations of basic ore components in itself: normal identification in the ore mass of the deposit and abnormal identification in the aureole part.

### Conclusion

1. Major components in the ores (Pb, Zn, Au, Ag, Cu, Cd, In, Bi and etc.), basic concentrates are considered sulphide minerals: sphalerite, galenite, chalcopyrite and pyrite. Certain legitimacy is observed in their identification, significant close positive correlation relations are noticed between them.

2. Proportions of amount of Pb and Zn changes differently in various spheres of deposit and it's connected with the variety of migration features of those elements during geochemical processes.

3. The analysis of mineralogical-geochemical features of polymetal mineralization of the deposit shows that basic carriers of Ag are galenite and sphalerite in the ores. The amount of Ag in galenite in the upper ore-carrying horizons are higher than in lower horizons.

4. Au participated in all mineral-forming stages (pyrite-chalcopryrite, sphalerite-chalcopryrite, magnetite-sulphide) and its high amount correspond to maximum concentration field of Cu mineralization.

5. The availability of close correlation relations between Pb, Zn, Cu, Au and Ag gives us basis to think that they are the products of single geochemical processes.

6. Sphalerite and sphalerite-galenite ores in specific lead-zinc ore mass are of great importance and the conduction of complex investigation work is recommended by applying mineralogical geochemical methods for revealing new ore mass in northern and north-eastern flanks.

#### References

1. Kerimov A.D. (1965). *Petrology and mineralization of the Mehmanian granitoid intrusive*. Baku, Azerbaijan Academy of Sciences Press, 165 p. (in Russian).
2. *Geology of Azerbaijan. Useful Minerals*. (2006). Baku, Nafta-Press, vol. 5, 574 p. (in Russian).
3. *Mineral-Raw Resources of Azerbaijan (conditions of formation, patterns of placement, scientific foundations of forecasting)*. (2005). V.M. Baba-zade (Ed.). Baku, Ozan Publ., 808 p. (in Russian).
4. *Geology of Azerbaijan. Tectonics*. (2005). Baku, Nafta-Press, vol. 4, 505 p. (in Russian).
5. *Geology of Azerbaijan. Magmatism*. (2001). Baku, Nafta-Press, vol. 3, 524 p. (in Russian).
6. Mansurov M.I., Kalandarov B.G., Safarov E.I. (2017). Geological-genetical features and conditions of localization of the ores of copper-porphyry deposits of Mehmanian ore district (Azerbaijani part of Lesser Caucasus). *Ural Geological Journal*, No. 6, pp. 48-57. (in Russian).
7. Mansurov M.I. (2013). Factors of localization of copper-polymetallic mineralization of the Elbekdash deposit (Small Caucasus, Azerbaijan). *Bulletin of the Baku University. Natural Sciences Series*, No. 1, pp. 99-109. (in Russian).
8. Zaytseva L.V., Rafibeyli P. Kh. (1964). Structural features of Mehmanian ore field and stage of mineralization. *Conformity of distribution of useful minerals*. Moscow, Nauka Publ., vol. 7, pp. 64-79. (in Russian).
9. Khalilova T.A. (1972). *Mineralogy of Mehmanian group of pig-zinc sites*. Baku, Elm Publ., 72 p. (in Russian).
10. Kalandarov B.G. (2010). *Polymetallic ore formation of the Lesser Caucasus*. Dissertation Thesis. Baku, 50 p. (in Russian).
11. Naumov N.B., Girnis A.V., Dorofeyeva V.A., Kovalenker V.A. (2016). Concentration of ore elements and in magmatic melt and natural fluids according to the concerned study of the inclusions in minerals. *Geology of Ore Deposits*, vol. 58 (4), pp. 367-384. (in Russian).
12. Ilyasov N.R. (1974). *Geochemistry of gold and silver in the deposits and in one of ore fields of the Lesser Caucasus*. Dissertation Thesis. Baku, 38 p. (in Russian).
13. Chan Tuan Ann, Gaskov I.V., Chan Chong Hoa, Nevalko P.A., Fam Tkhi Zung (2012). Mineralogical-geochemical features and conditions of the formation of polymetallic deposits of the structure of Logam, North-Eastern Vietnam. *Geology and Geophysics*, vol. 55 (7), pp. 817-833. (in Russian).
14. Heydarov A.S., Efendiyev G.Kh., Lajinina N.F. (1966). Rare elements of the ores of Mehmanian group of polymetallic deposits. *Geochemistry of rare elements*. Baku, Azerbaijan Academy of Sciences Press, pp. 27-38. (in Russian).
15. Kovalev K.R., Distanov E.G., Anoshin G.N., Gaskov I.V., Akimtsev V.A., Baulina M.V. (2004). Gold and silver in the ores of volcanogenic hydrothermal and hydrothermal-sedimentary pyrite-polymetallic deposits of Siberia. *Geology and Geophysics*, vol. 45 (10), pp. 1171-1185. (in Russian).
16. Volkov A.V., Saava P.E., Kolova E.E., Prokofev V.Yu., Murashov K.Yu. (2018). Au-Ag epithermal deposits of double deposits (Chukotka, Russia). *Geology of Ore Deposits*, vol. 60 (6), pp. 596-609. (in Russian).
17. Mansurov M.I., Kalandarov B.G., Karimli U.I., Huseynov A.I. (2020). Distribution of gold and associated ore-bearing elements in gold-copper-pyrite ores of the Kyzybulag deposit (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*, No. 3 (207), pp. 51-59. Doi 10.18522/1026-2237-2020-3. (in Russian).
18. Baba-zade V.M., Bektashi S.A., Kalandarov B.G. (1995). Silver containing polymetallic ore of Azerbaijan part of the Lesser Caucasus. *News of Baku University. Series of Natural sciences*, No. 2, pp. 86-93. (in Russian).
19. Gaskov I.V., Vladimirov A.G., Khanchuk A.I., Pavlova G.A., Gvozdev V.I. (2017). Peculiarities of distribution of indium in the ores of several polymetallic and tin-sulphide deposit of Siberia and Far East of Russia. *Geology of Ore Deposits*, No. 1, pp. 62-74. (in Russian).
20. *Geochemistry of process of migration of ore elements*. (1977). N.I. Khitarov (Ed.). Moscow, Nauka Publ., 70 p. (in Russian).
21. Danilchenko V.A., Vargunina N.P., Gordeyev S.G., Orlov B.Yu. (2004). Hidden lead-zinc mineralization within the boundaries of region of Gaudor, Sadonsky

ore district. *Geology and Exploration*, No. 1, pp. 37-42. (in Russian).

22. Dobrovolskaya M.G. (1989). *Lead-zinc mineralization (ore formation, mineral paragenesis, features of mineralization)*. Moscow, Nauka Publ., 216 p. (in Russian).

#### Литература

1. Керимов А.Д. Петрология и рудоносность Мехманинского гранитоидного интрузива. Баку: АН Азерб. ССР, 1965. 165 с.

2. Геология Азербайджана. Полезные ископаемые. Баку: Nafta-Press, 2006. Т. V. 574 с.

3. Минерально-сырьевые ресурсы Азербайджана (условия формирования, закономерности размещения, научные основы прогнозирования) / под. ред. проф. В.М. Баба-заде. Баку: Озан, 2005. 808 с.

4. Геология Азербайджана. Тектоника. Баку: Nafta-Press, 2005. Т. IV. 505 с.

5. Геология Азербайджана. Магматизм. Баку: Nafta-Press, 2003. Т. III. 524 с.

6. Мансуров М.И., Каландаров Б.Г., Сафаров Э.И. Геолого-генетические особенности и условия локализации руд медно-порфировых месторождений Мехманинского рудного района (азербайджанская часть Малого Кавказа) // Уральский геол. журн. 2017. № 6. С. 48–57.

7. Мансуров М.И. Факторы локализации медно-полиметаллического оруденения Элбекдашского месторождения (Малый Кавказ, Азербайджан) // Вестн. Бакинского ун-та. Серия естественных наук. 2013. № 1. С. 99–109.

8. Зайцева Л.В., Рафибейли Р.Х. Структурные особенности Мехманинского рудного поля и стадийность рудообразования // Закономерности размещения полезных ископаемых. М.: Наука, 1964. Т. 7. С. 64–79.

9. Халилова Т.А. Минералогия Мехманинской группы свинцово-цинковых месторождений. Баку: Элм, 1972. 76 с.

10. Каландаров Б.Г. Полиметаллические рудные формации Малого Кавказа : автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Баку, 2010. 49 с.

11. Наумов Н.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Коваленкер В.А. Концентрация рудных элементов в магматических расплавах и природных флюидах по данным изучения включений в минералах // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 4. С. 367–384.

12. Ильясов Н.Р. Геохимия золота и серебра в месторождениях и рудопрооявлениях в одном из рудных

полей Малого Кавказа : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Баку, 1974. 38 с.

13. Чан Туан Ань, Гаськов И.В., Чан Чонг Хоа, Невалько П.А., Фам Тхи Зунг. Минералого-геохимические особенности и условия образования полиметаллических месторождений структуры Логам Северо-Восточного Вьетнама // Геология и геофизика. 2012. Т. 55, № 7. С. 817–833.

14. Гейдаров А.С., Эфендиев Г.Х., Лажинина Н.Ф. Редкие элементы руд Мехманинской группы полиметаллических месторождений // Геохимия редких элементов. Баку: Изд-во АН АзССР, 1966. С. 27–38.

15. Ковалев К.Р., Дистанов Э.Г., Аношин Г.Н., Гаськов И.В., Акимцев В.А., Баулина М.В. Золото и серебро в рудах вулканогенных гидротермальных и гидротермально-осадочных колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 10. С. 1171–1185.

16. Волков А.В., Саава Р.Е., Колова Е.Е., Прокофьев В.Ю., Мурашов К.Ю. Au-Ag эпитеpмальное месторождение двойное (Чукотка, Россия) // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60, № 6. С. 596–609.

17. Мансуров М.И., Каландаров Б.Г., Керимли У.И., Гусейнов А.И. Распределение золота и сопутствующих рудогенных элементов в золото-медноколчеданных рудах Кызылбулагского месторождения (Малый Кавказ, Азербайджан) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 3. С. 51–59. Doi 10.18522/1026-237-2020-3-51-59.

18. Баба-заде В.М., Бекташи С.А., Каландаров Б.Г. Серебросодержащие полиметаллические руды азербайджанской части Малого Кавказа // Вестн. Бакинского ун-та. Серия естеств. наук. 1995. № 2. С. 86–93.

19. Гаськов И.В., Владимиров А.Г., Ханчук А.И., Павлова Г.А., Гвоздев В.И. Особенности распределения индия в рудах некоторых полиметаллических и оловосульфидных месторождений Сибири и Дальнего Востока России // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59, № 1. С. 62–74.

20. Геохимия процессов миграций рудных элементов / под ред. Н.И. Хитарова. М.: Наука, 1977. 270 с.

21. Данильченко В.А., Варгунина Н.П., Гордеев С.Г., Орлов Б.Ю. Скрытая свинцово-цинковая минерализация в пределах участка Гаудор Садонского рудного района // Геология и разведка. 2004. № 1. С. 37–42.

22. Добровольская М.Г. Свинцово-цинковое оруденение (рудные формации, минеральные парагенезисы, особенности рудообразования). М.: Наука, 1989. 216 с.

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

## BIOLOGICAL SCIENCES

УДК 631.414

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-99-105

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЧВ ЗАПОВЕДНИКА «ХАНКАЙСКИЙ»  
(ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)© 2021 г. О.М. Голодная<sup>1</sup>, Е.А. Жарикова<sup>1</sup><sup>1</sup>Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты  
Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, РоссияPARTICLE-SIZE DISTRIBUTION IN SOILS  
OF THE KHANKAISKIY NATURE RESERVE (PRIMORYE TERRITORY)О.М. Golodnaya<sup>1</sup>, Е.А. Zharikova<sup>1</sup><sup>1</sup>Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity,  
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Голодная Ольга Михайловна – научный сотрудник, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку, 159, г. Владивосток, 690022, Россия, e-mail: omgolodnaya@mail.ru

Olga M. Golodnaya - Researcher, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 100 let Vladivostoku Ave., 159, Vladivostok, 690022, Russia, e-mail: omgolodnaya@mail.ru

Жарикова Елена Анатольевна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку, 159, г. Владивосток, 690022, Россия, e-mail: ejarikova@mail.ru

Elena A. Zharikova - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 100 let Vladivostoku Ave., 159, Vladivostok, 690022, Russia, e-mail: ejarikova@mail.ru

Определен гранулометрический состав и рассмотрены особенности его вертикального распределения в почвах различных ландшафтов государственного природного биосферного заповедника «Ханкайский». Выявлены 3 варианта распределения ила и физической глины по профилю почв: аккумулятивный, регрессивный и вариант с максимумом в середине профиля на фоне более или менее одинакового содержания ила в верхних и нижних горизонтах. В буроземах глееватых, дерново-буро-подзолистых, темногумусово-глеевых и аллювиальных луговых глеевых почвах выявлен регрессивный вариант, для которого характерен среднесуглинистый песчано-крупнопылевой состав верхних горизонтов и легко- или среднесуглинистый состав средней и нижней частей профиля. В буроземах типичных и аллювиальных луговых глееватых почвах наблюдается распределение тонких фракций по профилю с постепенным уменьшением их содержания с глубиной, при этом гранулометрический состав слоя меняется со среднесуглинистого на легкосуглинистый. В перегнойно-глеевых почвах выявлен характер вертикального распределения тонких фракций с максимумом в средней части профиля, который формируется под влиянием сочетания пойменного процесса с привнесением и переотложением взвешенных частиц и глееобразования. Решающую роль в дифференциации тонких фракций в профиле почв играют литологические особенности осадконакопления исходного почвообразующего материала.

**Ключевые слова:** гранулометрический состав, распределение элементарных частиц, ил, физическая глина, заповедник.

Soil texture is determined and the features of particle-size vertical distribution in soils of different landscapes of the Khankaiskiy Nature Reserve are considered. Three variants of the distribution of clay (<0.001 mm) and physical clay (<0.01 mm) fractions along the vertical profiles soils are identified: accumulative, regressive, with a maximum in the middle-profile horizon and with their approximately equal contents in the upper and the lower horizons. A regressive variant is revealed in bu-

rozems gleyic, podzolic-brownzems, dark-humus gley and alluvial meadow gley soils. These soils are characterized by a medium loamy sandy-coarse-dusty composition of the upper horizons and a light- or medium-loamy composition of the middle and lower parts of the profile. The distribution of fine fractions along the profile is observed with a gradual decrease in their content with depth in typical burozems and alluvial meadow gleyic soils, while the texture of the layer changes from medium loamy to light loamy. The vertical distribution of fine fractions with a maximum in the middle part of the profile is revealed in mucky gley soils. The profile is formed under the influence of a combination of the floodplain process with the introduction and redeposition of suspended particles and gleying. The lithological specificity of the accumulation of the initial parent materials plays a decisive role in the differentiation of fine fractions in the soil profile.

**Keywords:** soil texture, particle-size distribution, clay, physical clay, nature reserve.

## Введение

Заповедники, являясь самой высокой формой охраны природы, обеспечивают сохранность не только генофонда исчезающих видов растений и животных, но и эталонных экосистем. Как базовый компонент биоценоза, почва определяет его устойчивость. Анализ и сравнение основных характеристик почв заповедников с параметрами почв преобразованных территорий позволяют выявить тренды и степень их изменений. Необходимость и актуальность изучения состава, свойств и процессов, протекающих в почвах заповедных территорий, не вызывают сомнений [1–3].

Государственный природный биосферный заповедник «Ханкайский» расположен вдоль южного и восточного побережья озера Ханка в центральной части эрозионно-аккумулятивной Уссурийско-Ханкайской равнины, поверхность которой почти горизонтальна [4, 5]. Низменная часть равнины сложена мощными толщами рыхлых осадочных отложений: третичных галечников, песков, глин и суглинков и четвертичных озерно-речных супесей, суглинков и глин. В долинах рек, наряду с глинистыми и мелкопесчаными аллювиальными отложениями, широко распространены крупноскелетные песчаногравелистые галечниковые отложения большой водопроницаемости. Литологический состав понижений между увалами представлен в основном глинами, лежащими на песках, перекрытых сверху торфяниками мощностью 2,5–3,0 м [4]. Глинистые отложения тугопластичной консистенции обладают низкой водопроницаемостью и являются зоной формирования верховодки, что в условиях избыточного увлажнения способствует процессу заболачивания и развитию глееобразования [6]. Делювиальные отложения образуют шлейфы у подножий возвышенностей.

Существенным фактором, оказывающим влияние на состояние окружающей среды заповедника, являются озеро Ханка и речная сеть его бассейна. Равнинный характер рек, малая зеленность территории, небольшие сечения русел рек и слабые уклоны местности способствуют паводковым наводнениям в период выпадения

муссонных осадков, когда реки выносят большое количество рыхлого материала. Многослойность литологического сложения почв данной местности отмечена неоднократно [7, 8].

Одним из фундаментальных свойств, оценка которого необходима для почв любой категории земель, является их гранулометрический состав [9, 10]. Содержание и распределение частиц в почвенном профиле служат диагностическим признаком и используются для установления классификационной принадлежности почв, в частности для выделения разновидности [11]. Гранулометрический состав определяет физические, физико-химические и биологические свойства почв, влияет на тепловой и водно-воздушный режимы. Песчаная и крупнопылевая фракции состоят преимущественно из обломков горных пород, кварца и полевых шпатов. В составе средней пыли высоко содержание слюд. Тонкопылевая и илистая фракции содержат минимум первичных минералов, в них преобладают глинистые минералы, органоминеральные и гумусовые вещества [12].

Данные о гранулометрическом составе указываются в основном научном документе заповедников – Летописи природы.

Цель данной работы – определить гранулометрический состав и рассмотреть особенности его вертикального распределения в почвах различных ландшафтов государственного природного биосферного заповедника «Ханкайский».

## Объекты и методы

Исследования почвенного покрова выполнялись в 2018–2019 гг. с использованием сравнительно-географического, морфологического и сравнительно-аналитического методов. В различных ландшафтных условиях были заложены разрезы и отобраны образцы почв погоризонтно. Почвы представлены буроземами типичными и глееватыми, дерново-буро-подзолистыми, темно-гумусово-глеевыми, аллювиальными гумусовыми глеевыми и глееватыми, перегнойно-глеевыми. Морфологическое описание почв и их основных свойств выполнено ранее [13].

Плотность твердой фазы почв определена пикнометрическим методом, гранулометрический состав – седиментационным (пипеткой) после обработки почвы раствором пиррофосфата натрия [14]. Экспериментально определяли содержание шести фракций: 1–0,25, 0,25–0,05, 0,05–0,01, 0,01–0,005, 0,005–0,001, <0,001 мм, используемых в классификации Н.А. Качинского, принятой в России [9, 15].

### Результаты и обсуждение

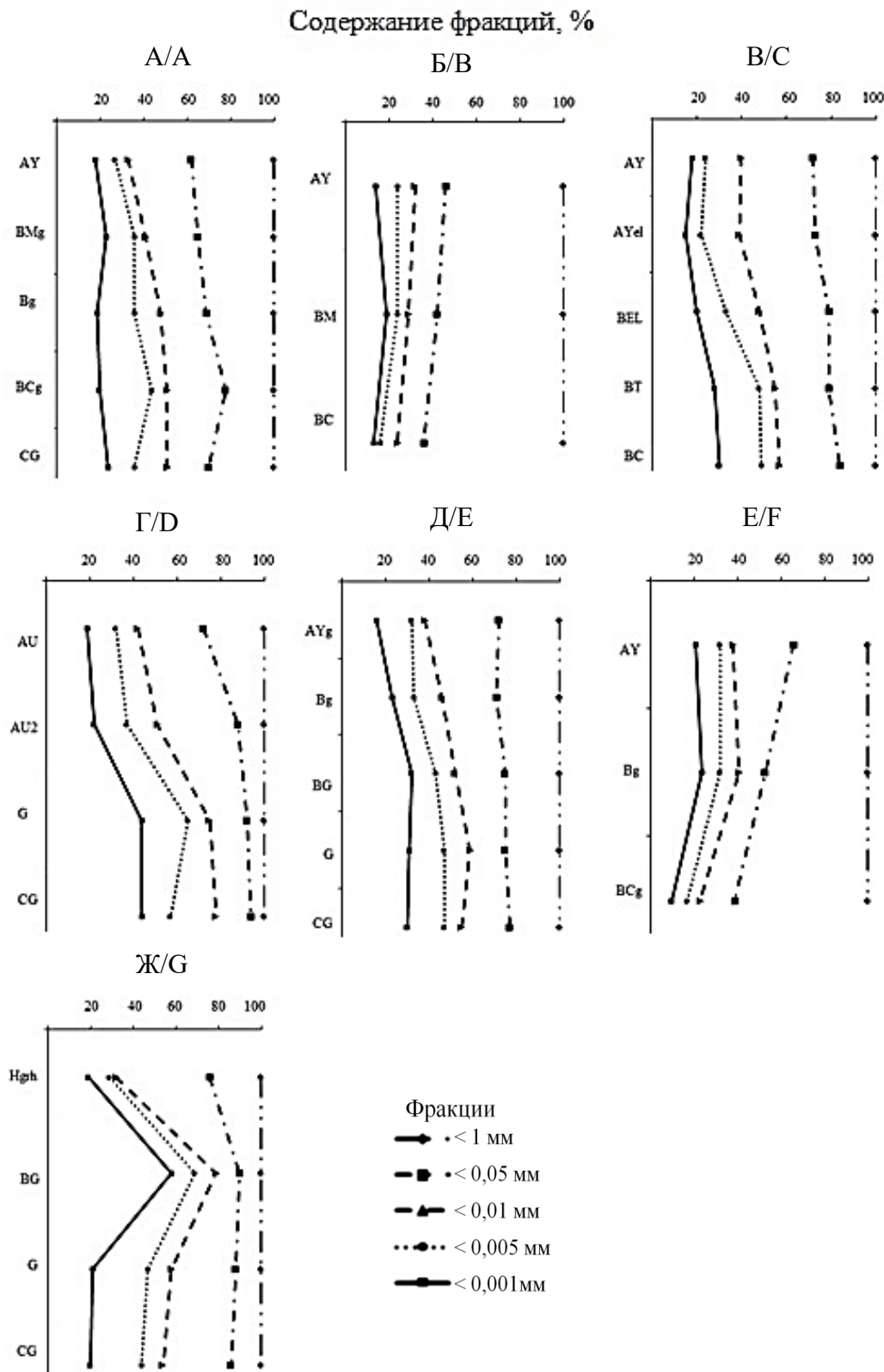
Плотность твердой фазы буроземов варьирует от 2,37–2,55 в гумусовых горизонтах до 2,63–2,72 г/см<sup>3</sup> в глубине профиля. Они являются средними суглинками (таблица).

Максимальное содержание илистой фракции в буроземах как типичных, так и глееватых отмечается в

структурно-метаморфическом горизонте (как результат процессов оглинивания in situ и лессиважа). В буроземах типичных, развитых на останцовых возвышенностях на щебнистых породах, преобладают песчаная и пылеватая фракции. В них наблюдается аккумулятивный характер распределения тонких фракций по профилю с постепенным уменьшением их содержания с глубиной, при этом гранулометрический состав слоя ВС меняется на легкосуглинистый. В буроземах глееватых, развитых на слабодренированных пологих склонах на озерно-аллювиальных отложениях, преобладают иловатая и пылеватая фракции и с глубиной происходит утяжеление состава до легкоглинистого. Данные почвы характеризуются регрессивным вариантом профильного распределения ила и физической глины, когда содержание последних фракций значительно увеличивается с глубиной (рисунок).

Гранулометрический состав типичных почв заповедника, % от абсолютно сухой почвы  
/ Particle-size distribution different horizons of typical soils, %

Горизонт	Глубина, см	Размер фракций, мм						
		1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01
Бурозем типичный среднесуглинистый (Р. 8–18)								
AY	0–24	6	48	14	8	10	14	32
Bm	24–42	6	52	13	5	5	19	29
BC	42–70	10	54	12	8	3	13	24
Бурозем глееватый среднесуглинистый (Р. 5–19)								
AY	0–14	0	38	29	6	9	18	33
BMg	14–36	0	35	24	5	13	23	41
Bg	36–62	0	31	21	12	17	19	48
BCg	62–75	0	22	27	7	24	20	51
Cg	75–90	0	30	19	15	12	24	51
Дерново-буро-подзолистая среднесуглинистая (Р. 5–18)								
AY	0–18	1	26	33	16	6	18	40
AYel	18–26	3	24	34	11	13	15	39
BEL	26–39	2	19	31	15	13	20	48
BT	39–56	1	20	24	7	20	28	55
BC	56–70	0	16	27	8	19	30	57
Темногумусово-глеевая тяжелосуглинистая (Р. 6–18)								
AU	0–29	0	28	30	10	13	19	42
AU2	29–50	0	12	37	14	15	22	51
G	50–86	0	8	14	13	21	44	78
CG	86–95	0	6	16	21	13	44	78
Аллювиальная гумусовая глеевая среднесуглинистая (Р. 3–19)								
AYg	0–32	1	27	34	6	16	16	38
Bg	32–49	1	28	25	13	10	23	46
BG	49–65	1	20	27	9	11	32	52
G	65–85	1	19	18	12	16	34	62
CG	85–97	0	23	22	8	17	30	55
Аллювиальная луговая глееватая среднесуглинистая (Р. 4–18)								
AY	0–24	0	34	28	6	11	21	38
Bg	24–65	0	47	12	9	8	24	41
BCg	65–90	0	61	16	6	7	10	23
Перегноино-глеевая среднесуглинистая (Р. 9–18)								
Hg rh	0–28	0	24	44	3	10	19	32
BG	28–47	0	10	11	10	11	58	79
G	47–70	0	12	30	11	26	21	58
CG	70–89	0	14	32	10	24	20	54



Вертикальное распределение гранулометрического состава по профилю почв: А – бурозем глееватый; Б – бурозем типичный; В – дерново-буро-подзолистая почва; Г – темногумусово-глеевая почва; Д – аллювиальная гумусовая глеевая почва; Е – аллювиальная луговая глееватая почва; Ж – перегнойно-глеевая почва / The vertical distribution patterns of particle-size fractions in soils: A - burozem gleyic; B - typical burozem; C - podzolie-brownzem; D - dark-humus gley soil; E - alluvial meadow gleyic soil; F - alluvial meadow gley soil; G - mucky gley soil

В поверхностных слоях дерново-буро-подзолистых почв плотность твердой фазы составляет 2,28–2,46, в глубоких – 2,63–2,70 г/см<sup>3</sup>. Почвы, формирующиеся на средних частях пологих склонов сопок на суглинистых или глинистых отложениях, являются среднесуглинистыми. В верхних горизонтах содержание фракции физической глины составляет 36–40 %, в элювиальном тяжелосуглинистом слое BEL – 48–50, в глубоких слоях – более 55 %. В составе мелкозема преобладает крупная пыль. Содержание мелкого песка значительно и достигает 27 % в верхних горизонтах, вниз по профилю его количество снижается. Минимум илистой фракции выявлен в гумусовом и осветленном слоях – 10–18 %, отмечается обогащенность илом средней части профиля, в почвообразующей породе его содержание немного снижается, что полностью согласуется с полученными ранее данными [16]. Вертикальный характер распределения фракций физической глины и ила регрессивный, когда параллельно процессу накопления в профиле почв тонких фракций с глубиной происходит снижение содержания количества фракций мелкого песка и крупной пыли (рисунок).

В темногумусово-глеевых почвах плотность твердой фазы увеличивается с глубиной с 2,28–2,57 до 2,65–2,70 г/см<sup>3</sup>. Эти почвы, распространенные на обширных равнинах озерных террас на тяжелых, практически водонепроницаемых отложениях при близком уровне залегания грунтовых вод, относятся к тяжелым суглинкам. С глубиной суглинка сменяются легкими и средними глинами, при этом содержание физической глины варьирует в пределах от 51 до 78 %. В составе мелкозема преобладают преимущественно пылеватые фракции. Содержание ила в гумусово-аккумулятивных горизонтах колеблется от 11 до 21 %, в нижней части профиля может достигать 44 %. Содержание крупной пыли практически стабильно по всему профилю. Прослеживается регрессивный вариант профильного распределения фракций ила и физической глины, когда их содержание значительно увеличивается с глубиной в процессе глееобразования, что характерно для гидроморфных почв Приханкайской низменности [16, 17].

Плотность твердой фазы аллювиальных почв в гумусовом горизонте варьирует в пределах 2,54–2,61, в глубине профиля – 2,69–2,73 г/см<sup>3</sup>. Хотя аллювиальные гумусовые глеевые и аллювиальные луговые глееватые почвы относятся к средним суглинкам, в них различно распределение тонких фракций по профилю, что связано с особенностями условий их формирования. В случае аллювиальных луговых глееватых почв визуально хорошо выражена литологическая смена пород в связи с изме-

няющимися условиями осадконакопления. Почвы формируются на плоских выровненных пространствах, на удалении от современных русел рек вне зоны аккумуляции современного аллювия, в условиях периодического атмосферного переувлажнения под влиянием атмосферных осадков и при близком залегании грунтовых вод. В профиле наблюдается накопление в верхней и средней частях тонких частиц, содержание ила – 21–24 %. Глубже 65 см лежит легкосуглинистый аллювий с высоким содержанием мелкопесчаной и минимальной илистой фракции. В профиле почв отчетливо прослеживается аккумулятивный характер распределения ила и физической глины. Аллювиальные луговые глеевые почвы, развитые в пойме р. Мельгуновка на пластичных серо-бурых глинах и регулярно подвергающиеся влиянию паводков, характеризуются регрессивным вариантом профильного распределения ила и физической глины. Наименьшее содержание ила отмечается в верхнем горизонте, с глубиной оно возрастает параллельно снижению содержания фракций мелкого песка и крупной пыли.

Плотность твердой фазы в поверхностных слоях перегнойно-глеевых почв самая низкая – 2,32–2,41, в глубоких горизонтах она достигает 2,69–2,70 г/см<sup>3</sup>. Почвы формируются в поймах рек в неглубоких понижениях рельефа на аллювиальных отложениях тяжелого гранулометрического состава. Верхний слой почв среднесуглинистый, глеевые горизонты – глинистые. Наибольшее содержание физической глины (до 79 %) и илистой фракции (до 58 %) наблюдается в средней части профиля. В поверхностном горизонте содержание ила невысоко (16–19 %). Преобладающей в составе мелкозема является фракция крупной пыли (до 44 %), значительно также содержание мелкого песка (до 24 %). Подобное сочетание фракций свидетельствует об активном протекании пойменного процесса (с привнесением и переотложением взвешенных частиц) одновременно с процессом глееобразования. Этому типу почв присущ вариант вертикального распределения тонких фракций с максимумом в средней части профиля.

### Заключение

Гранулометрический состав почв заповедника «Ханкайский» зависит главным образом от литологических особенностей почвообразующего материала: осадочных отложений разного возраста и генезиса. Литогенная неоднородность почвообразующих пород играет решающую роль в дифференциации тонких фракций в профиле почв. На формирование вертикального распределения различных фракций

влияют интенсивность процессов внутрипочвенного выветривания, характер осадконакопления и переотложения мелкозема в пойменных зонах, зависящий от интенсивности водных потоков. В толще практически всех почв выявлено высокое содержание фракций 0,25–0,05 и 0,05–0,01 мм (мелкого песка и крупной пыли) при отсутствии или незначительном содержании фракции 1,0–0,25 мм. Содержание ила в поверхностных слоях составляет 10–19 %, в средней и нижней частях профиля может достигать 44–58 %. В почвах, развитых на аллювиальных породах, преобладают песчаная и илистая фракции, а в почвах, развитых на озерных глинах, – крупнопылеватая и илистая фракции. Выделено три варианта вертикального распределения содержания ила и физической глины по профилю почв заповедника: аккумулятивный, регрессивный и вариант с максимумом в середине профиля на фоне относительно равного содержания ила в поверхностных и глубоких слоях. В большинстве почв преобладает регрессивный вариант, для которого характерен среднесуглинистый песчано-крупнопылеватый состав верхних горизонтов и легко- или среднеглинистый состав средней и нижней частей профиля.

#### Литература

1. Костенков Н.М., Ознобихин В.И., Голодная О.М. Система охраны и Красная книга почв Дальнего Востока // Вестн. ДВО РАН. 2000. № 4. С. 74–83.
2. Добровольский Г.В., Чернова О.В., Семенов О.В., Богатырев Л.Г. Принципы выбора эталонных объектов при создании Красной книги почв России // Почвоведение. 2006. № 4. С. 387–395.
3. Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации. М.: Инфосфера – НИА-Природа, 2012. 476 с.
4. Ганешин Г.С. Геоморфология Приморья. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 135 с.
5. Никольская В.В. Рельеф Приуссурийских равнин и его значение для сельского хозяйства Приморского и Хабаровского краев // Материалы по физической географии юга Дальнего Востока / отв. ред. Б.П. Колесников, Г.Д. Рихтер, В.В. Никольская. М.: АН СССР, 1953. С. 64–111.
6. Корляков А.С. Лугово-болотные почвы зоны рисо-сеяния Приморья // Генезис и биология почв юга Дальнего Востока: к 70-летию со дня рождения Г.И. Иванова / отв. ред. Л.Н. Щапова, В.И. Ознобихин. Владивосток: ДВО РАН, 1994. С. 274–285.
7. Назаркина А.В. Особенности физических свойств и водного режима аллювиальных почв пойм рек Сихотэ – Алия // Почвоведение. 2008. № 5. С. 576–586.
8. Шелест Л.Г. Пойменные почвы юго-востока Приморского края. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2001. 168 с.

9. Шейн Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций // Почвоведение. 2009. № 3. С. 309–317.

10. Юдина А.В., Фомин Д.С., Котельникова А.Д., Милановский Е.Ю. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) // Почвоведение. 2018. Почвоведение. 2018. № 11. С. 1340–1362. Doi 10.1134/S0032180X18110096.

11. Классификация и диагностика почв России / авт. и сост.: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

12. Battsetseg D., Khagvasuren Ch.L., Batkhashig O., Zoljargal Kh. Soils of Buyant river basin: types, properties, and relation to other environmental parameters // Изв. вузов. Сев-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 1. С. 26–35. Doi 10.18522/1026-2237-2020-1-26-35.

13. Жарикова Е.А., Голодная О.М. Почвы заповедника «Ханкайский» (участки «Журавлиный», «Чертово болото») // Биота и среда заповедных территорий. 2020. № 1. С. 39–61. Doi 10.25808/26186764.2020.34.69.002.

14. Растворова О.Г. Физика почв: практ. руководство. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 196 с.

15. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.

16. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.

17. Крейда Н.А. Гидроморфные почвы Приморья // Учен. зап. ДВГУ. Сер. почв.-ботан. 1969. Т. XXV. С. 1–67.

#### References

1. Kostenkov N.M., Oznobikhin V.I., Golodnaya O.M. (2000). Protection system and Red Data Book for soils of the Far East. *Vestn. DVO RAN*, No. 4, pp. 74-83. (in Russian).
2. Dobrovolskii G.V., Chernova O.V., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G. (2006). Principles of Selecting Reference Soils for the Red Data Book of Russian Soils. *Eurasian Soil Science*, vol. 39, No. 4, pp. 347-353.
3. *Soils of Nature Reserves and National Parks of the Russian Federation*. (2012). Moscow, Infosphera - NIA-Priroda Publ., 476 p. (in Russian).
4. Ganeshin G.S. (1957). *Geomorphology of Primorye*. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 135 p. (in Russian).
5. Nikol'skaya V.V. (1953). Relief of the Priussurian plains and its significance for agriculture Primorsky and Khabarovsk territories. *Materials on the Physical Geography of the South of the Far East*. B.P. Kolesnikov, G.D. Rikhter, V.V. Nikol'skaya (Eds.). Moscow, SSSR Academy of Sciences Press, pp. 64-111. (in Russian).

6. Korlyakov A.S. (1994). Meadow-bog soils in the rice-growing zone of Primorye. *Soil Genesis and Biology of the South of the Far East: on the 70th Birthday of G.I. Ivanov*. L.N. Shehapova, V.I. Oznobikhin (Eds.). Vladivostok, FEB RAS Press, pp. 274-285. (in Russian).
7. Nazarkina A.V. (2008). Physical properties and hydraulic regime of alluvial soils in floodplains of rivers in the Sikhote-Alin Mountains. *Eurasian Soil Science*, No. 5, pp. 509-518.
8. Shelest L.G. (2001). *Floodplain soils of the south-east of Primorsky Krai*. Vladivostok, Pacific Institute of Geography of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Press, 168 p.
9. Shein E.V. (2009). The particlesize distribution in soils: Problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification. *Eurasian Soil Science*, No. 3, pp. 284-291.
10. Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Y. (2018). From the notion of elementary soil particle to the particlesize and microaggregate-size distribution analyses: a review. *Eurasian Soil Science*, vol. 51, No. 11, pp. 1340–1362. Doi 10.1134/S0032180X18110096.
11. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. (2004). *Classification and Diagnostic System of Russian Soils*. Smolensk, Oikumena Publ., 342 p. (in Russian).
12. Battsetseg D., Khagvasuren Ch.L., Batkhishig O., Zoljargal Kh. (2020). Soils of Buyant river basin: types, properties, and relation to other environmental parameters. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science)*, No. 1, pp. 26-35. (in Russian). Doi 10.18522/1026-2237-2020-1-26-35.
13. Zharikova E.A., Golodnaya O.M. (2020). Soils of the Khankaiskiy Nature Reserve: the Zhuravlinyy and Chertovo bog clusters. *Biodiversity and Environment of Protected Areas*, No. 1, pp. 39-61. Doi 10.25808/26186764.2020.34.69.002.
14. Rastvorova O.G. (1983). *Soil Physics. Practical Guide*. Leningrad, LSU Press, 196 p. (in Russian).
15. Kachinsky N.A. (1958). *Mechanical and microaggregate composition of soil, methods of its study*. Moscow, SSSR Academy of Sciences Press, 192 p. (in Russian).
16. Ivanov G.I. (1976). *Soil-Forming Processes in the South of the Far East*. Moscow, Nauka Publ., 200 p. (in Russian).
17. Kreyda N.A. (1969). Hydromorphic soils of Primorye. *Uchenye zapiski Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo universiteta*, vol. 25, pp. 1-67. (in Russian).

УДК 58.006:502.75 (470.61)

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-106-112

## БИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ РАСТЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ОХРАНЯЕМОГО ЛАНДШАФТА «РАЗДОРСКИЕ СКЛОНЫ» (РОСТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)\*

© 2021 г. *О.Ю. Ермолаева<sup>1</sup>, В.В. Федяева<sup>1</sup>, А.Н. Шмараева<sup>1</sup>, А.В. Горовцов<sup>1</sup>*<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

## BIOLOGICAL DIVERSITY OF PLANTS IN THE TERRITORY OF THE PROTECTED LANDSCAPE “RAZDORSKIE SKLONY” (ROSTOV REGION)

*O.Yu. Ermolaeva<sup>1</sup>, V.V. Fedyaeva<sup>1</sup>, A.N. Shmaraeva<sup>1</sup>, A.V. Gorovtsov<sup>1</sup>*<sup>1</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

*Ермолаева Ольга Юрьевна – кандидат биологических наук, доцент, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пер. Ботанический спуск, 7, г. Ростов-на-Дону, 344041, Россия, e-mail: Ermolaeva@mail.ru*

*Olga Yu. Ermolaeva - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Botanicheskyy Spusk Lane, 7, Rostov-on-Don, 344041, Russia, e-mail: Ermolaeva@mail.ru*

*Федяева Валентина Васильевна – кандидат биологических наук, доцент, научный консультант, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пер. Ботанический спуск, 7, г. Ростов-на-Дону, 344041, Россия, e-mail: vfedyaeva@gmail.com*

*Valentina V. Fedyaeva - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Scientific Consultant, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Botanicheskyy Spusk Lane, 7, Rostov-on-Don, 344041, Russia, e-mail: vfedyaeva@gmail.com*

*Шмараева Антонина Николаевна – старший научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пер. Ботанический спуск, 7, г. Ростов-на-Дону, 344041, Россия, e-mail: anshmaraeva@srfedu.ru*

*Antonina N. Shmaraeva - Senior Researcher, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Botanicheskyy Spusk Lane, 7, Rostov-on-Don, 344041, Russia, e-mail: anshmaraeva@srfedu.ru*

*Горовцов Андрей Владимирович – кандидат биологических наук, доцент, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пер. Ботанический спуск, 7, г. Ростов-на-Дону, 344041, Россия, e-mail: gorovtsov@gmail.com*

*Andrey V. Gorovtsov - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Botanicheskyy Spusk Lane, 7, Rostov-on-Don, 344041, Russia, e-mail: gorovtsov@gmail.com*

Дается оценка флороценотического богатства особо охраняемой природной территории (ООПТ) «Раздорские склоны» Ростовской области (РО), где функционируют 84 ООПТ, включая охраняемый ландшафт «Раздорские склоны». Он состоит из трёх кластерных участков общей площадью 1117,64 га и представляет собой типичный для правобережного коренного склона долины р. Дон живописный природно-исторический ландшафт с ковыльными степями, южными байрачными лесами, выходами понтических известняков-ракушечников, песков яновской свиты и полосой аллювиальной пойменной равнины. Растительность правого коренного склона долины Дона отличается большой формационной пестротой и мозаичностью. Это связано с быстрой и резкой сменой факторов среды на довольно

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0029 / The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state assignment in the field of scientific activity No. 0852-2020-0029.

ограниченном пространстве, что в значительной степени определяет богатство и самобытность его флористического комплекса. На территории охраняемого ландшафта представлены подзональные разнотравно-дерновиннозлаковые, а также гемипсаммофитные (полупесчаные) и петрофитные степи; байрачные, пойменные леса и заросли кустарников. Растительный покров отличается невысокой степенью антропогенной деструкции и достаточно репрезентативен синтаксономически и флористически. Флора охраняемого ландшафта насчитывает 693 вида высших сосудистых растений, включая 29 таксонов из Красных книг РО и Российской Федерации, суммарно 183 таксона из Красного списка Международного союза охраны природы (93 вида) и Европейского Красного списка (145 видов). Особенностью байрачных лесов охраняемого ландшафта является наличие в их составе термофильных субсредиземноморских видов ксерофильно-дубравного (кверцетального) флороценогенетического комплекса. Многочисленные ценопопуляции лесных эфемероидов образуют в байрачных лесах и зарослях кустарников весеннюю синусию, являясь временным «коллективным доминантом».

**Ключевые слова:** Ростовская область, охраняемый ландшафт, «Раздорские склоны», биологическое разнообразие растений, разнотравно-дерновиннозлаковая степь, гемипсаммофитная степь, петрофитная степь, байрачный лес, пойменный лес, Красная книга.

*The article is aimed to assess the florocenotic diversity of the specially protected natural territory of the Rostov region "Razdorskie sklony". In the Rostov region there are 84 specially protected natural areas (PA), including the protected landscape "Razdorskie sklony". The PA consists of three cluster sites with a total area of 1117.64 hectares. The "Razdorskie sklony" are a picturesque natural-historical landscape, typical for the right-bank slope of the Don valley. It has a long history of cultural development. Here there are feather grass steppes, the southernmost ravine upland forests, outcrops of pontic limestone-shell rocks, sands of the Yanovskaya formation and clay outcrops on the slopes, with a strip of alluvial floodplain. The vegetation of the right bedrock slope of the Don valley is distinguished by great formational variegation and mosaicism, due to the rapid and abrupt change of environmental factors in a rather limited space, which largely determines the richness and originality of its floristic complex. On the territory of the protected landscape, subzonal forb-sod grass, as well as hemipsammophytic (semi-sandy) and petrophytic steppes are present. Woody vegetation is represented by gully, floodplain forests and thickets of bushes. The vegetation cover of the "Razdorskie sklony" is distinguished by a low degree of anthropogenic destruction and is quite representative in syntaxonomic and floristic terms. The flora of the protected landscape includes 693 species of higher vascular plants, including 29 taxa from the Red Books of the Rostov Region and the Russian Federation, a total of 183 taxa from the Red List of the International Union for Conservation of Nature (93 species) and the European Red List (145 species). Forest vegetation in the gullies of the protected areas is represented by ravine, floodplain forests and thickets of bushes. In the system of zoning of the ravine forests of the Lower Don, the ravine forests of the "Razdorskie sklony" belong to one of the most southern regions – the Crimean-Donetsk region. Numerous cenopopulations of forest ephemeroids form spring synusia in ravine forests and thickets of shrubs, being a temporary "collective dominant".*

**Keywords:** Rostov region, protected landscape, "Razdorskie sklony", biological diversity, the forb-bun-grass steppe, hemipsammophytic steppe, petrophytic steppe, ravine forest, floodplain forest, Red Book.

Ростовская область (РО), площадь которой составляет 10080,00 тыс. га, расположена в степной зоне, являющейся наиболее трансформированным типом зональных ландшафтов Северной Евразии [1]. В области функционируют 84 особо охраняемых природных территории (ООПТ) общей площадью 233,49 тыс. га (2,32 % от территории области), в том числе ООПТ федерального значения (государственный природный биосферный заповедник «Ростовский», государственный природный заказник «Цимлянский», Ботанический сад Южного федерального университета), ООПТ областного значения (государственные природные заказники «Горненский» и «Левобережный», природный парк «Донской», 41 охраняемый ландшафт, 20 охраняемых природных объектов), 17 ООПТ местного значения [2].

В целях оптимизации системы ООПТ РО в последние годы проведён большой объём исследований по выявлению биологического разнообразия на

территориях охраняемых ландшафтов – природных комплексов площадью более 100 га как естественного, так и искусственного происхождения, имеющих природоохранную, просветительскую, эстетическую и научную ценность [3].

ООПТ «Раздорские склоны» создана в 2006 г., находится в центральной части РО, на юго-западе Усть-Донецкого административного района, между станицей Раздорской и хутором Ольховским, на правом коренном склоне долины р. Дон. ООПТ состоит из трёх кластерных участков общей площадью 1117,64 га. «Раздорские склоны» представляют собой типичный для правобережного коренного склона долины Дона живописный природно-исторический ландшафт с ковыльными степями, наиболее южными байрачными и нагорными лесами, выходами понтических известняков-ракушечников, песков яновской свиты неогена и глинистыми обнажениями на склонах, с примыкающей полосой аллювиальной пойменной равнины. Эта территория –

одно из местонахождений позднемиоценовой ископаемой флоры в глинистых прослоях песчаной яновской свиты (листовой ориктокомплекс). Белые и желтоватые пески яновской свиты имеют мощность более 60 м, а над этими песками залегают опесчаненные раннепонтические (новороссийские) известняки-ракушечники [4] (рисунок).

В геоморфологическом отношении ООПТ находится на стыке равнин: Донецкой возвышенной (Донецкий кряж) и террасированной аллювиально-аккумулятивной Нижне-Донской. Долинно-балочный рельеф на ООПТ представлен многочисленными симметричными ображистыми балками разной степени разветвленности. Они круто обрываются к пойме Дона с перепадом высот до 100 м

и впадают в старое русло Дона – р. Сухой Донец. Склоны балок крутые, местами обрывистые, их днища узкие, расширения приурочены к устьевым частям балок.

Охраняемый ландшафт «Раздорские склоны» расположен на границе двух ботанико-географических районов Нижнего Дона – долины нижнего течения Дона и Донецкого кряжа. Растительность правого коренного склона долины Дона отличается большой формационной пестротой и мозаичностью, обусловленными быстрой и резкой сменой факторов среды на довольно ограниченном пространстве, что в значительной степени определяет богатство и самобытность его флористического комплекса [5].



Охраняемый ландшафт «Раздорские склоны» / Protected landscape "Razdorskie sklony"

В соответствии с региональным геоботаническим районированием ООПТ расположена в подзоне настоящих разнотравно-дерновиннозлаковых степей [6].

Типичные подзональные степи (ассоциации: *Stipa pulcherrima* + *Stipa lessingiana* – *Festuca valesiaca* + *Herbae stepposae*, *Stipa pulcherrima* + *Stipa lessingiana* + *Herbae stepposae*, *Stipa dasyphylla* + *Herbae stepposae*, *Stipa pulcherrima* + *Herbae stepposae* и др.) образуют на «Раздорских склонах» небольшие фрагменты, расположенные на пологих приводораздельных склонах. В основном же степная растительность пред-

ставлена более сухими, сильно обеднёнными вариантами разнотравно-дерновиннозлаковых степей, собственными эродированным долинным и балочным склонам, а также эдафическими вариантами: гемипсаммофитными (на выходах неогеновых песков и супесей) и кальцефитно-петрофитными (на выходах рыхлых известняков-ракушечников) степями.

Обеднённая разнотравно-дерновиннозлаковая степь является переходной от типичной к сухой дерновиннозлаковой и физиономически отличается тем, что основу злакового травостоя составляют мелкoderновинные злаки (в основном *Stipa*

*lessingiana* Trin. et Rupr., *Festuca valesiaca* Gaudin, *Koeleria cristata* (L.) Pers.) с примесью крупнотравянистых (*Stipa capillata* L., *S. pulcherrima* K. Koch, *S. ucrainica* P. Smirn.).

Разнотравье в её составе по преимуществу ксерофильное (*Achillea nobilis* L., *Asparagus officinalis* L., *Astragalus austriacus* Jacq., *A. onobrychis* L., *Centaurea orientalis* L., *Dianthus lanceolatus* Stev. ex Reichenb. [*D. pallens* Sibth. et Smith, *D. leptopetalus* subsp. *typicus* Kleop.], *Galatella villosa* (L.) Reichenb. fil., *Galium octonarium* (Klok.) Soo, *Inula germanica* L., *I. oculochristi* L., *I. salicina* L. subsp. *aspera* (Poir.) Hayek, *Marrubium praecox* Janka, *Medicago falcata* L. subsp. *romanica* (Prod.) Schwarzet Klinkovski [*M. romanica* Prod.], *Nepeta parviflora* Bieb., *Oxytropis pilosa* (L.) DC., *Salvia nutans* L., *S. tesquicola* Klok. et Pobed., *Seseli tortuosum* L., *Stachys atherocalyx* K. Koch, *Verbascum chaixii* Vill. subsp. *orientale* (Bieb.) Hayek [*V. marschallianum* Ivanina et Tzvel., *V. austriacum* auct. non Roem. et Schult.], *V. ovalifolium* Donn ex Sims, *Veronica spicata* L. и др.).

К разнотравью в значительном количестве примешиваются ксерофильные полукустарнички (*Artemisia austriaca* Jacq., *Ephedra distachya* L., *Kochia prostrata* (L.) Schrad., *Thymus marschallianus* Willd. и др.).

В разнотравно-дерновиннозлаковой степи более или менее обильно представлены виды травы перекати-поле (*Eryngium campestre* L., *Falcaria vulgaris* Bernh., *Goniolimon tataricum* (L.) Boiss., *Limonium platyphyllum* Lincz., *Phlomis pungens* Willd., *Serratula erucifolia* (L.) Boriss. и др.).

В составе степной растительности ООПТ довольно много весенних эфемеров (*Androsace elongata* L., *A. maxima* L., *Arenaria viscida* Hall. fil. ex Loisel., *Ceratocephala testiculata* (Crantz) Bess., *Erophila verna* (L.) Bess., *Holosteum syvaschicum* Kleop. [*H. umbellatum* subsp. *syvaschicum* (Kleop.) Tzvel.], *Veronica polita* Fries, *V. praecox* All. и др.) и эфемероидов (*Gagea bulbifera* (Pall.) Salisb., *G. pusilla* (F.W. Schmidt) Schult. et Schult. fil., *Ornithogalum kochii* Parl., *Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil., *T. schrenkii* Regel, *Valeriana tuberosa* L. и др.), а также гемизэфемероидов (*Adonanthe volgensis* (Stev. ex DC.) Chrtk et Slaviková, *Bellevalia sarmatica* (Pall ex Misch.) Woronow, *Iris pumila* L., *Pulsatilla pratensis* (L.) Mill., *Rindera tetraspis* Pall. и др.). Видовая насыщенность этого варианта степей невелика (12–15 видов на 1 м<sup>2</sup>), высота травостоя – 40–70 см.

Гемипсаммофитные (полупесчаные) степи встречаются на «Раздорских склонах» небольшими по площади фрагментами на выходах песков и супесчаных почв по склонам балок, пересекающих коренной берег. Их растительность носит переходный характер между подзональными и псаммофитными

степями. Это проявляется в смешанном составе и в большей разреженности травостоя. В гемипсаммофитных степях ООПТ выделены ассоциации: *Stipa zaleskii* + *Festuca valesiaca* + *Herbae stepposae*, *Stipa pulcherrima* + *Koeleria sabuletorum* + *Calophaca wolgarica* + *Herbae stepposae*, *Stipa pulcherrima* – *Agropyron pectinatum* – *Artemisia marchalliana* + *Herbae stepposae*, *Stipa zaleskii* + *Agropyron pectinatum* + *Bothriochloa ischaemum* + *Herbae stepposae*, *Stipa dasyphylla* + *Festuca beckeri* + *Bothriochloa ischaemum* + *Herbae stepposae* и др. В составе разнотравья индикаторами лёгкого механического состава почв являются псаммофиты: *Agropyron lavrenkoanum* Prokud., *Astragalus varius* S.G. Gmel., *Centaurea majorovii* Dumb., *Dianthus polymorphus* Bieb., *Jurinea cyanoides* (L.) Reichenb., *Galium verum* L. (incl. *G. ruthenicum* Willd., *G. tomentellum* Klok.), *Gypsophila paniculata* L., *Helichrysum arenarium* (L.) Moench, *Onobrychis arenaria* (Kit.) DC., *Psammophiliella muralis* (L.) Ikon. [*Gypsophila muralis* L.], *Scabiosa ucrainica* L., *Secale sylvestre* Host и др.

Второй эдафический вариант степной растительности (незначительный по площади) на ООПТ – петрофитные (каменистые, или тимьянниковые) степи, приуроченные к склонам с близким залеганием рыхлых известняков и щебневатым недоразвитым почвам на продуктах их выветривания. Обычно это открытые к югу и достаточно крутые склоны коренного берега Дона. Они относятся к кальцефитно-петрофитному варианту сухих дерновиннозлаковых степей и более ксерофильны, чем зональные. Роль разнотравья в них выше, чем в зональных степях. Специфическая особенность этих степей заключается в обилии видов рода *Rosa* L., многие из которых являются результатом автохтонного видообразования. Петрофитные степи на ООПТ представлены ассоциациями: *Bothriochloa ischaemum* + *Festuca valesiaca* + *Herbae petrophytic-stepposae*, *Bothriochloa ischaemum* + *Koeleria cristata* + *Hedysarum grandiflorum* + *Herbae petrophytic-stepposae*. Среди злаков петрофитных степей более или менее обычны *Agropyron pectinatum* (Bieb.) Beauv., *Stipa lessingiana*, *S. capillata*, *Cleistogenes bulgarica* (Bornm.) Keng, *Bromopsis riparia* (Rehm.) Holub.

В составе петрофитностепных сообществ обычны ксерофильные степные и пустынно-степные виды (*Achillea leptophylla* Bieb., *Alyssum desertorum* Stapf, *Astragalus pseudotataricus* Boriss., *Euphorbia stepposa* Zoz и др.), а также эври- и кальцепетрофиты (*Alyssum tortuosum* Waldst. et Kit. ex Willd., *Centaurea marschalliana* Spreng., *Cephalaria uralsensis* (Murr.) Schrad. ex Roem. et Schult., *Dianthus pseudarmeria* Bieb., *Euphorbia seguieriana* Neck., *Echinops ritro* L., *Herniaria besseri* Fisch. ex Hornem., *Jurinea multiflora* (L.) B. Fedtsch., *Linum czernjajevii*

Klok., *Salvia verticillata* L., *Silene supina* Bieb., *Spiraea hypericifolia* L., *Teucrium polium* L., *Thymus calcareus* Klok. et Shost. s. l. [incl. *Thymus cretaceus* Klok. et Shost.], *T. dimorphus* Klok. et Shost., *Xeranthemum annuum* L. и др.). Типичных сообществ петрофитной растительности – тимьянников на территории ООПТ не отмечено, хотя разреженные группировки переходного характера встречаются.

Лесная растительность в балках ООПТ представлена байрачными, пойменными лесами и зарослями кустарников. В системе районирования байрачных лесов нижнего Дона байрачные леса «Раздорских склонов» относятся к одному из наиболее южных районов – Крымско-Донецкому [7]. На территории «Раздорских склонов» находятся самые западные по правобережью долины Дона слабооблесённые балки, леса угнетены и низкостелетны. Они приурочены к нижним и в меньшей степени средним частям склонов, к глубоким днищам балок.

На ООПТ встречаются фрагменты формаций байрачных дубрав (субформация упрощённых и простых дубрав, где из спутников *Quercus robur* L. обычны *Fraxinus exelsior* L. и *Acer campestre* L.) и берестняков (доминирует *Ulmus campestris* L. [*U. glabra* Mill., *U. minor* Mill., *U. carpinifolia* Gled.] с участием *Pyrus communis* L., *Acer tataricum* L. и др.), причём последние по площади преобладают. В местах, где сохранились фрагменты леса коренного варианта, в травяном покрове доминируют лесные виды *Melica picta* K. Koch, *Dactylis glomerata* L., *Poa nemoralis* L., *Elymus caninus* (L.) L., *Brachypodium pubescens* (Peterm.) Mussaejev [*B. sylvaticum* (Huds.) P. Beauv. subsp. *pubescens* (Peterm.) Tzvelev], однако на «Раздорских склонах» чаще встречаются фрагменты производных дубрав с сорно-лесными видами в травяном ярусе (*Alliaria petiolata* (Bieb.) Cavara et Grande, *Anthriscus cerefolium* (L.) Hoffm., *Aristolochia clematidis* L., *Ballota nigra* L., *Galium aparine* L., *Geum urbanum* L., *Chelidonium majus* L., *Leonurus glaucescens* Bunge, *Urtica dioica* L.). Формация байрачных берестняков может быть вторичным образованием на месте сведённых дубрав, однако на территории «Раздорских склонов» они развиваются как географический вариант байрачных лесов, так как *Ulmus campestris* L. более засухоустойчив, чем *Quercus robur* L.

Особенность байрачных лесов «Раздорских склонов» – наличие в их составе термофильных субсредиземноморских видов ксерофильно-дубравного (кверцетального) флорценогенетического комплекса [7]: *Aegonychon purpureo-caeruleum* (L.) Holub, *Dictamnus gymnostylis* Stev. [*D. albus* auct.], *Hesperis pycnotricha* Borb. et Degen, *Ligustrum vulgare* L., *Ornithogalum boucheanum* (Kunth) Aschers., *Physalis*

*alkekengi* L., *Symphytum tauricum* Willd., *Vinca herbacea* Waldst. et Kit. и др. Территория Донецкого кряжа в пределах РО является рефугиумом широколиственных лесов росс-вюрмского межледникового и ксеротермического рефугиумом голоцена [8].

На территории ООПТ представлены также разнообразные по составу байрачные кустарниковые формации из *Amygdalus nana* L., *Caragana frutex* (L.) K. Koch, *Cerasus fruticosa* Pall., *C. mahaleb* (L.) Mill. [*Prunus mahaleb* L., *Padellus mahaleb* (L.) Vass., *Padus mahaleb* (L.) Borkh.], *Crataegus ambigua* C.A. Mey. ex Beck., *C. rhipidophylla* Gand., *Euonymus pubescens* Stev., *E. verrucosus* Scop., *Ligustrum vulgare* L., *Rhamnus cathartica* L., видов рода *Rosa* L. (*R. alba* L. [*R. corymbifera* Borkh. × *R. gallica* L.], *R. balsamica* Bess. [*R. psammophila* Chrshan.], *R. canina* L. s. l., *R. grossheimii* Chrshan. [*R. talijevii* Dubovik] и др.), *Swida sanguinea* (L.) Opiz. и др. Наиболее распространённой является монодоминантная формация *Prunus spinosa* L. subsp. *dasyphylla* (Schur) Domin. Травяной покров кустарниковых зарослей разрежен и состоит из сорно-лесных, лугово-степных, степных и опушечных видов.

Многочисленные ценопопуляции лесных эфемероидов (*Ficaria verna* P. Smirn., *Corydalis solida* (L.) Clairv., *C. marschalliana* (Pall. ex Willd.) Pers., *Scilla siberica* Haw., *Anemonoides ranunculoides* (L.) Holub, *Tulipa biebersteiniana* Schult. et Schult. fil., *Fritillaria ruthenica* Wikstr.) образуют в байрачных лесах и зарослях кустарников весеннюю синузидию, являясь временным «коллективным доминантом».

Небольшой массив пойменного леса (формация *Ulmus campestris*, ассоциация: *Ulmus campestris* + *Urtica dioica*) занимает прирусловую часть поймы Сухого Донца. По гребню коренного склона долины Дона встречаются также полезащитные и противоэрозионные лесонасаждения из *Armeniaca vulgaris* Lam., *Caragana arborescens* Lam., *Cotinus coggygria* Scop., *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. [*F. lanceolata* Borkh., *F. viridis* Michx.], *Morus alba* L., *Quercus robur* L., *Robinia pseudacacia* L., *Sambucus nigra* L., *Ulmus pumila* L. и др.

В многочисленных балках ООПТ встречаются сочетания самых разнообразных сообществ, относящихся к разным типам растительности (степная, лесная, опушечная, луговая, псаммофитная, петрофитная, бурьянистая и др.).

В целом растительный покров «Раздорских склонов» отличается относительно невысокой степенью антропогенной деструкции и достаточно репрезентативен синтаксономически и флористически. Изучение флоры и растительности ООПТ, редких и исчезающих видов растений целенаправленно проводится в течение 30 лет [9–11].

По предварительным данным, флора «Раздорских склонов» насчитывает 693 вида высших сосудистых растений (36,1 % от флоры РО), включая 29 краснокнижных таксонов РО [12], в том числе 12 видов из Красной книги Российской Федерации\* [13] (*Aegonychon purpureo-caeruleum* (L.) Holub, *Anemone sylvestris* L., *Anemonoides ranunculoides* (L.) Holub, *Bellevalia sarmatica* (Pall. ex Georgi) Woronow\*, *Calophaca wolgarica* (L. f.) DC.\*, *Campanula trachelium* L., *Centaurea ruthenica* Lam., *Corydalis marschalliana* Pers., *C. solida* (L.) Clairv., *Crataegus ambigua* C.A. Mey. ex Beck., *Crocus reticulatus* Stev. ex Adams, *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott, *Elytrigia stipifolia* (Czern. ex Nevski) Nevski (incl. *E. cretacea* (Klok. et Prokud.) Klok. et Prokud.) [*Agropyron stipifolium* Czern. ex Nevski]\*, *Fritillaria ruthenica* Wikstr.\*, *Hedysarum grandiflorum* Pall.\*, *Iris pumila* L.\*, *Ornithogalum boucheanum* (Kunth) Aschers., *Polygonatum multiflorum* (L.) All., *Pulsatilla pratensis* (L.) Mill. s. l. (incl. *P. bohémica* (Skalysky) Tzvel., = *P. nigricans* Stoerk)\*, *Scilla siberica* Haw., *Silene hellmannii* Claus\*, *Stipa borys-thenica* Klok. ex Prokud., *S. dasyphylla* (Lindem.) Trautv.\*, *S. pulcherrima* K. Koch.\*, *Stipa ucrainica* P. Smirn. [*S. zaleskii* subsp. *ucrainica* (P. Smirn.) Tzvel.], *Stipa zaleskii* Wilensky\*, *Thymus calcareus* Klok. et Shost. s. l. (incl. *Thymus cretaceus* Klok. et Shost.), *Tulipa schrenkii* Regel [*T. gesneriana* L.]\*, *Ulmus glabra* Huds.) и суммарно 183 таксона из Красного списка Международного союза охраны природы (93 вида) [14] и Европейского Красного списка (144 вида) [15].

#### Литература

1. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы) / ред. Л.В. Бардунов, В.С. Новиков. М.: КМК, 2008. 855 с.
2. Шмараева А.Н., Кузьменко И.П., Шишлова Ж.Н. Новая ценопопуляция *Calophaca wolgarica* (L. fil.) DC. на территории охраняемого ландшафта «Раздорские склоны» (Ростовская область) // Биоразнообразие и рациональное использование природных ресурсов. Махачкала: Алеф, 2020. С. 41–44.
3. Федяева В.В., Шмараева А.Н., Шишлова Ж.Н., Буркина Т.М. Растительный покров и флора Раздорского этнографического музея-заповедника // Историко-культурные и природные исследования на территории Раздорского этнографического музея-заповедника (к 80-летию Л.Т. Агаркова). Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 2003. Вып. 1. С. 108–148.
4. Клеонов Ю.Д. Анализ флоры широколиственных лесов европейской части СССР. Киев: Наукова думка, 1990. 352 с.
5. Шишлова Ж.Н., Шмараева А.Н., Федяева В.В. Состояние популяции *Aegonychon purpureo-caeruleum*

(L.) Holub на территории памятника природы «Раздорские склоны» (Ростовская область) // Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. Ярославль; Переславль-Залесский: Канцлер, 2012. С. 97–102.

6. Чибилёв А.А. Степная Евразия: региональный обзор природного разнообразия. М.; Оренбург: Ин-т степи РАН; РГО, 2016. 324 с.

7. Федяева В.В., Шмараева А.Н., Хибухина Т.Ю., Шишлова Ж.Н., Кузьменко И.П. Редкие виды растений и грибов на территориях охраняемых природных объектов Ростовской области // Живые и биокосные системы. 2018. № 26. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-26/article-5> (дата обращения: 12.03.2021).

8. Новиков Н.А., Федяева В.В. Материалы по флоре яновской свиты верхнего миоцена Нижнего Дона // Науч. сообщество студентов XXI столетия. Естеств. науки : материалы VII студ. междунар. заочн. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2013. С. 23–28.

9. Красная книга Ростовской области. Растения и грибы. 2-е изд. / науч. ред. В.В. Федяева. Ростов н/Д.: Минприроды Ростовской области, 2014. Т. 2. 344 с.

10. Красный список МСОП: IUCN 2020. URL: <http://www.iucnredlist.org> (дата обращения: 12.03.2021).

11. Bilz M., Kell S.H., Maxted N., Lansdown R.V. European Red List of Vascular Plants. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2011. 130 p.

12. Горбачёв Б.Н. Растительность и естественные кормовые угодья Ростовской области. Ростов н/Д.: Рост. кн.е изд-во, 1974. 152 с.

13. Федяева В.В. Растительный покров // Природные условия и естественные ресурсы Ростовской области. Ростов н/Д.: Батайское кн. изд-во, 2002. С. 226–282.

14. Зозулин Г.М. Леса Нижнего Дона. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1992. 208 с.

15. Об охраняемых ландшафтах и охраняемых природных объектах : Постановление Правительства Ростовской области от 12.05.2017 № 354. URL: <http://www.donland.ru/documents> (дата обращения: 12.03.2021).

#### References

1. Red Data Book of the Russian Federation (plants and mushrooms). (2008). L.V. Bardunov, V.S. Novikov (Eds.). Moscow, KMK Publ., 855 p. (in Russian).
2. Shmaraeva A.N., Kuzmenko I.P., Shishlova Zh.N. (2020). New coenopopulation of *Calophaca wolgarica* (L. fil.) DC. on the territory of the protected landscape “Razdorskies slopes” (Rostov region). *Biodiversity and rational use of natural resources*. Makhachkala, Alef Publ., pp. 41–44. (in Russian).
3. Fedyaeva V.V., Shmaraeva A.N., Shishlova Zh.N., Burkina T.M. (2003). Vegetation and flora of the Razdorsky ethnographic museum-reserve. *Historical, cultural and natural research on the territory of the Razdorsky ethnographic*

*museum-reserve*. Rostov-on-Don, Rostov University Press, vol. 1, pp. 108-148. (in Russian).

4. Kleopov Yu.D. (1990). *Analysis of the flora of deciduous forests of the European part of the USSR*. Kiev, Naukova dumka Publ., 352 p. (in Russian).

5. Shishlova Zh.N., Shmaraeva A.N., Fedyaeva V.V. (2012). The state of the population of *Aegonychon purpureo-caeruleum* (L.) Holub on the territory of the natural monument "Razdorskie slopes" (Rostov region). *Abstracts of the All-Russian Scientific-Practical Conference*. Yaroslavl, Pereslavl-Zalessky, Kantsler Publ., pp. 97-102. (in Russian).

6. Chibilev A.A. (2016). *Steppe Eurasia: a regional review of natural diversity*. Moscow, Orenburg, Steppe Institute RAS, Russian Geographical Society Press, 324 p. (in Russian).

7. Fedyaeva V.V., Shmaraeva A.N., Khibukhina T.Yu., Shishlova Zh.N., Kuzmenko I.P. (2018). Rare species of plants and fungi on the territories of protected natural objects of the Rostov region. *Zhivye i biokosnye sistemy*, No. 26. Available at: <http://www.jbks.ru/archive/issue-26/article-5> (accessed March 12, 2021). (in Russian).

8. Novikov N.A., Fedyaeva V.V. (2013). Materials on the flora of the Yanovskaya suite of the Upper Miocene of the Lower Don. *Scientific community of students of the 21st century. Natural sciences*. Proceedings of the VII Students

International Scientific-Practical Conf. Novosibirsk, SibAK Publ., pp. 23-28. (in Russian).

9. *Red Data Book of the Rostov Region*. (2014). Rostov-on-Don, The Ministry of Natural Resources of the Rostov region Press, vol. 2, 344 p. (in Russian).

10. *IUCN Red List: IUCN*. (2020). Available at: <http://www.iucnredlist.org> (accessed March 12, 2021).

11. Bilz M., Kell S.H., Maxted N., Lansdown R.V. (2011). *European Red List of Vascular Plants*. Luxembourg, Publications Office of the European Union Press, 130 p.

12. Gorbachev B.N. (1974). *Vegetation and natural forage lands of Rostov region*. Rostov-on-Don, Rostov Book Publishing House, 152 p. (in Russian).

13. Fedyaeva V.V. (2002). Vegetation cover. *Natural conditions and natural resources of the Rostov region*. Rostov-on-Don, Bataysk Publishing House, pp. 226-282. (in Russian).

14. Zozulin G.M. (1992). *The Forests of Lower Don*. Rostov-on-Don, Rostov University Press, 208 p. (in Russian).

15. Decree of the Government of the Rostov region at 05.12.2017 No. 354 "On protected landscapes and protected natural objects". Available at: <http://www.donland.ru/documents> (accessed March 12, 2021). (in Russian).

УДК 663.125/663.252.4

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-113-118

## УСТОЙЧИВОСТЬ ДРОЖЖЕЙ *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* К ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ

© 2021 г. Э.А. Исламмагомедова<sup>1</sup>, Э.А. Халилова<sup>1</sup>, Р.З. Гасанов<sup>1</sup>, А.А. Абакарова<sup>1</sup>, Д.А. Аливердиева<sup>1</sup><sup>1</sup>Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия

## THE RESISTANCE OF YEAST *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* TO EXTREME CONDITIONS

*E.A. Islammagomedova<sup>1</sup>, E.A. Khalilova<sup>1</sup>, R.Z. Gasanov<sup>1</sup>, A.A. Abakarova<sup>1</sup>, D.A. Aliverdieva<sup>1</sup>*<sup>1</sup>Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

Исламмагомедова Эльвира Ахмедовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: [islammagomedova@mail.ru](mailto:islammagomedova@mail.ru)

Elvira A. Islammagomedova - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: [islammagomedova@mail.ru](mailto:islammagomedova@mail.ru)

Халилова Эсланда Абдурахмановна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: [eslanda61@mail.ru](mailto:eslanda61@mail.ru)

Eslanda A. Khalilova - Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: [eslanda61@mail.ru](mailto:eslanda61@mail.ru)

Гасанов Расул Закирович – младший научный сотрудник, лаборатория биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: [gasanov@bk.ru](mailto:gasanov@bk.ru)

Rasul Z. Gasanov - Junior Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: [gasanov@bk.ru](mailto:gasanov@bk.ru)

Абакарова Аида Алевдиновна – старший лаборант, лаборатория биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: [aida.abakarva@rambler.ru](mailto:aida.abakarva@rambler.ru)

Aida A. Abakarova - Senior Laboratory Assistant, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: [aida.abakarva@rambler.ru](mailto:aida.abakarva@rambler.ru)

Аливердиева Динара Алиевна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией биохимии и биотехнологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия, e-mail: [aliverdieva\\_d@mail.ru](mailto:aliverdieva_d@mail.ru)

Dinara A. Aliverdieva - Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, M. Gadzhieva St., 45, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000, Russia, e-mail: [aliverdieva\\_d@mail.ru](mailto:aliverdieva_d@mail.ru)

Изучена устойчивость дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* DAW-3a и Y-503 к экстремальным значениям pH, NaCl, температуры. При различных режимах культивирования отмечается сохранение округлой формы клеток DAW-3a и изменение данного параметра Y-503. При различных pH и температуре 30 °C обнаружены максимальные размеры клеток и гигантских колоний полиплоидного штамма Y-503 по сравнению с гаплоидным DAW-3a; при 37 °C преимущества Y-503 не наблюдались и размеры колоний обоих штаммов были практически одинаковыми. Реакция штаммов на критические концентрации NaCl в среде была идентичной: установлено уменьшение размеров клеток и колоний, изменение формы, поверхности, цвета и структуры колоний. В условиях одновременного влияния повышенной температуры 37 °C, широкого спектра pH и 5 % NaCl размеры клеток уменьшались незначительно, в нейтральных и щелочных условиях культивирования установлена несколько большая толерантность дрожжей к солевому стрессу; обнаружено уменьшение размеров гигантских колоний, при этом максимальный размер исследуемых штаммов отмечен при pH 11,0, минимальный – при pH 3,0. Исследование толерантности дрожжей *S. cerevisiae* DAW-3a и Y-503 к экстремальным факторам представляет определенный интерес в связи с возможностью использования стрессоустойчивых штаммов в биотехнологических процессах.

**Ключевые слова:** температурный стресс, осмотический стресс, pH-стресс, дрожжи, клетки, гигантские колонии, морфология.

The resistance of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* DAW-3a and Y-503 to the conditions of extreme values of pH, NaCl, temperature has been studied. Under different cultivation modes, the rounded shape of DAW-3a cells is preserved and this parameter Y-503 changes. Under conditions of different pH values and 30°C, the maximum sizes of cells and giant colonies of the polyploid Y-503 strain were found in comparison with the haploid DAW-3a; at 37°C, the advantage of Y-503 was not observed and the colony sizes of both strains were practically the same. The reaction of the strains to critical concentrations of NaCl in the medium was identical: a decrease in the size of cells and colonies was found; change in the shape, surface, color and structure of colonies. Under conditions of the simultaneous influence of an elevated temperature of 37°C, a wide range of pH and 5 % NaCl, the cell size decreased slightly; under neutral and alkaline conditions of cultivation, a slightly greater tolerance of yeast to salt stress was established; a decrease in the size of giant colonies was found, while the maximum size of the studied strains was noted at pH 11.0, the minimum at pH 3.0. The study of the tolerance of the yeast *S. cerevisiae* DAW-3a and Y-503 to extreme factors is of particular interest in connection with the possibility of using stress-resistant strains in biotechnological processes.

**Keywords:** temperature stress, osmotic stress, pH stress, yeast, cells, giant colonies, morphology.

Изучение влияния экстремальных условий на дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* и механизмы их адаптации вызывает большой интерес исследователей [1–4]. Биохимические и физиологические преобразования, происходящие в условиях стресса [5–7], оказывают влияние и на морфологические свойства дрожжей, в том числе на параметры гигантских колоний [8–11]. В результате одновременного воздействия различных видов стресса изменения, происходящие в метаболизме дрожжей, могут значительно отличаться [12]. На специфическую способность штаммов *Saccharomyces* к адаптации влияют их генетические различия, в частности полиплоидия [13]. В связи с этим определенный интерес представляет сравнительное изучение морфологических особенностей штаммов *S. cerevisiae* различной плоидности в условиях одновременного влияния нескольких стресс-факторов.

Цель работы – исследование морфологических свойств гаплоидного *S. cerevisiae* DAW-3a и полиплоидного *S. cerevisiae* Y-503 штаммов в результате воздействия экстремальных значений pH, температуры (Т), NaCl в среде культивирования.

Объекты исследования: *S. cerevisiae* Y-503 (гетерозиготный тетраплоид), полученный в результате воздействия лазера на промышленный штамм

*S. cerevisiae* 73 [14], и *S. cerevisiae* DAW-3a (гетероталличный гаплоид), потомок линии штамма Y-503 [15]. Морфологические исследования клеток проводили при всех режимах культивирования. Наблюдение вели за формой и величиной клеток, характером почкования с использованием светового микроскопа CX21 (Olympus, Япония). В зависимости от поставленной цели проводили окраску клеток. Карболовый фуксин Циля использовали для обнаружения в протоплазме метакроматина; раствор Люголя – для выявления гликогена, раствор судана (Судан III) – для окрашивания липидов. Для описания морфологической характеристики колоний рассматривали их размер, форму, поверхность, профиль, цвет и консистенцию. Размер колоний определяли по диаметру, см. Для выращивания гигантских колоний использовались твердые питательные среды YPD: дрожжевой экстракт – 0,5 % (BD, США), пептон – 0,5 % (BD, США), глюкоза (D-глюкоза) – 2,0 % (Merk, Германия), агар-агар – 2,5 % (Difco, Нидерланды). Культивирование проводили при Т, °C (30, 37), различных значениях pH (3,0; 4,5; 7,0; 9,0; 11,0) и концентрации NaCl, % (0, 5, 10, 15, 20), в течение 20 сут на чашках Петри с использованием микробиологического инкубатора BINDERBF 115 (Германия),

ламинарного бокса ВЛ-12 1000 (Россия), рН-метра «Анион 4100» («Анион», Россия), аналитических весов DV215CD (Ohaus Discovery, Швейцария).

*Условия культивирования:*  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $pH\ 3,0; 4,5; 7,0; 9,0; 11,0$ . Ранее показано, что оптимальным для роста дрожжей является значение  $pH\ 4,5$  при  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Параметры клеток и колоний обоих штаммов в данных условиях были приняты за контроль, в сравнении с которым в дальнейшем оценивается воздействие различных стресс-факторов. Установлено, что форма и размеры клеток DAW-3a и Y-503 отличаются в зависимости от пloidности штамма. Клетки DAW-3a обладают округлой формой при всех значениях  $pH$ , для клеток Y-503 характерно наличие удлиненных форм, количество которых по мере увеличения  $pH$  уменьшается. Средние размеры клеток в популяции DAW-3a при всех значениях  $pH$  значительно меньше по сравнению с Y-503, при этом наибольшими размерами обладают клетки в контроле ( $pH\ 4,5; 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При культивировании на средах с низким значением  $pH\ (3,0)$  наблюдается существенное уменьшение размеров клеток обоих штаммов (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние температуры и различных значений  $pH$  на средние размеры, мкм, и количество почкующихся клеток *S. cerevisiae* DAW-3a и Y-503 / Influence of temperature and different  $pH$  values on the middle size,  $\mu\text{m}$ , and the number of budding cells of *S. cerevisiae* DAW-3a and Y-503**

T, $^{\circ}\text{C}$ / pH	Средние размеры клеток, мкм / почкующиеся, %	
	<i>S. cerevisiae</i> DAW-3a	<i>S. cerevisiae</i> Y-503
30 / 3,0	$4 \times 4 \pm 0,3 / 3,9$	$8 \times 5 \pm 0,3 / 4,1$
37 / 3,0	$6 \times 6 \pm 0,3 / 4,1$	$8 \times 6 \pm 0,3 / 4,1$
30 / 4,5	$6 \times 6 \pm 0,3 / 4,5$	$11 \times 8 \pm 0,4 / 4,9$
37 / 4,5	$5 \times 5 \pm 0,3 / 3,5$	$10 \times 7 \pm 0,3 / 3,5$
30 / 7,0	$5 \times 5 \pm 0,3 / 3,0$	$10 \times 7 \pm 0,3 / 3,5$
37 / 7,0	$5 \times 5 \pm 0,3 / 3,2$	$10 \times 7 \pm 0,3 / 3,2$
30 / 9,0	$5 \times 5 \pm 0,3 / 3,5$	$9 \times 7 \pm 0,3 / 3,5$
37 / 9,0	$5 \times 5 \pm 0,3 / 3,2$	$9 \times 6 \pm 0,3 / 3,1$
30 / 11,0	$5 \times 5 \pm 0,3 / 3,4$	$9 \times 6 \pm 0,3 / 3,6$
37 / 11,0	$5 \times 5 \pm 0,3 / 3,5$	$8 \times 7 \pm 0,3 / 3,5$

Во всех вариантах обнаружены почкующиеся клетки и накопление запасных веществ. Включения гликогена, метахроматина, имеющего вид компактной массы, вкрапления липидных гранул выявлены в большем количестве по сравнению с контролем на средах с  $pH\ 3,0$  и  $11,0$ . Независимо от  $pH$  среды, определенные параметры гигантских колоний обоих штаммов были идентичны: округлая, в виде цветка форма; плоский, со слегка выпуклым цен-

тром профиль и радиально исчерченная поверхность. Незначительно варьировали цвет (оттенки бежевого) и структура (уплотнение при  $pH\ 11,0$ ). Наблюдалось существенное изменение размеров гигантских колоний (табл. 2) по сравнению с контролем ( $pH\ 4,5$ ) при явном преимуществе тетраплоида.

*Условия культивирования:*  $T=37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $pH\ 3,0; 4,5; 7,0; 9,0; 11,0$ . Округлая форма клеток DAW-3a обнаружена во всех вариантах, Y-503 – только на средах с  $pH\ 3,0$  и  $11,0$ . Удлиненная форма клеток тетраплоидного штамма Y-503 наблюдалась на средах с  $pH\ 4,5-9,0$ . Установлено уменьшение размеров клеток обоих штаммов по сравнению с контролем ( $pH\ 4,5; 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); остальные данные сопоставимы с показателями при  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этом обнаружено небольшое увеличение размеров клеток DAW-3a при  $pH\ 3,0$  (табл. 1). Отмечается во всех вариантах накопление в клетках дрожжей запасных питательных веществ (включения гликогена, метахроматина, липидных гранул).

При всех значениях  $pH$  для колоний обоих штаммов сохранялись: форма – округлая; профиль – плоский; поверхность – радиально исчерченная; структура – пастообразная. Колонии DAW-3a приобретали оттенок розоватого цвета. Размеры колоний значительно уменьшались по сравнению с контролем ( $pH\ 4,5; 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), однако в данных условиях преимущества тетраплоида Y-503 не наблюдалось (табл. 2).

Таблица 2

**Размер гигантских колоний *S. cerevisiae* DAW-3a и Y-503, см, при культивировании на средах YPD с различными значениями  $pH$  и NaCl при  $30$  и  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  / Size of giant colonies of *S. cerevisiae* DAW-3a and Y-503, sm, when cultivated on YPD media with different  $pH$  and NaCl values at  $30$  and  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$**

T, $^{\circ}\text{C}$ / NaCl, %	pH				
	3,0	4,5	7,0	9,0	11,0
37	$\frac{2,1 \times 2,0}{2,3 \times 2,1}$	$\frac{1,8 \times 1,7}{1,8 \times 1,6}$	$\frac{1,9 \times 1,9}{2,0 \times 1,7}$	$\frac{1,6 \times 1,5}{1,5 \times 1,5}$	$\frac{1,8 \times 1,7}{1,8 \times 1,7}$
	$\frac{0,6 \times 0,4}{0,5 \times 0,4}$	$\frac{0,7 \times 0,6}{0,7 \times 0,5}$	$\frac{0,6 \times 0,5}{0,6 \times 0,4}$	$\frac{0,8 \times 0,7}{0,8 \times 0,7}$	$\frac{0,9 \times 0,8}{0,9 \times 0,7}$
30	$\frac{1,8 \times 1,7}{2,2 \times 2,0}$	$\frac{2,8 \times 2,5}{3,0 \times 3,0}$	$\frac{1,7 \times 1,6}{2,4 \times 2,3}$	$\frac{1,7 \times 1,7}{1,8 \times 1,7}$	$\frac{1,6 \times 1,6}{1,8 \times 1,7}$
	$\frac{0,7 \times 0,5}{0,8 \times 0,6}$	$\frac{0,6 \times 0,5}{1,0 \times 0,9}$	$\frac{0,8 \times 0,7}{0,9 \times 0,8}$	$\frac{0,9 \times 0,8}{1,1 \times 0,9}$	$\frac{0,8 \times 0,7}{1,1 \times 0,9}$
30 / 10	$\frac{0,4 \times 0,3}{0,5 \times 0,3}$	$\frac{0,3 \times 0,2}{0,5 \times 0,3}$	$\frac{0,5 \times 0,3}{0,5 \times 0,4}$	$\frac{0,5 \times 0,3}{0,5 \times 0,4}$	$\frac{0,5 \times 0,3}{0,5 \times 0,4}$
	$\frac{0,1 \times 0,2}{0,2 \times 0,2}$	$\frac{0,1 \times 0,2}{0,2 \times 0,2}$	$\frac{0,2 \times 0,2}{0,2 \times 0,3}$	$\frac{0,3 \times 0,2}{0,3 \times 0,3}$	$\frac{0,3 \times 0,2}{0,3 \times 0,3}$
30 / 20	$\frac{0,1 \times 0,1}{0,1 \times 0,1}$	$\frac{0,1 \times 0,1}{0,1 \times 0,1}$	$\frac{0,1 \times 0,1}{0,1 \times 0,1}$	$\frac{0,1 \times 0,1}{0,1 \times 0,1}$	$\frac{0,1 \times 0,1}{0,1 \times 0,1}$

**Примечание.** *S. cerevisiae* DAW-3a – числитель, *S. cerevisiae* Y-503 – знаменатель.

Обнаружено, что размер колоний DAW-3a и Y-503 максимальный на средах с pH 3,0. Установлен факт толерантности исследуемых штаммов к кислой среде и температуре 37 °С, что представляет интерес для использования их в промышленной биотехнологии.

*Условия культивирования:* T=30 °С; pH 3,0; 4,5; 7,0; 9,0; 11,0; NaCl 0; 5; 10; 15; 20 %. Установлено, что большинство клеток DAW-3a имело округлую форму, клетки Y-503 – в основном овально-округлую, за исключением небольшого количества овальной (pH 4,5, 7,0), округлой (pH 3,0), яйцеобразной (pH 9,0) и удлинённой формы (в кислых средах составляли до 5 %, в щелочных – единицы). Реакция штаммов на критические концентрации NaCl в среде была идентичной. Наблюдалась способность дрожжей в условиях стресса корректировать рост и изменение объема клеток: по сравнению с контролем при высоких концентрациях NaCl размер клеток уменьшался, особенно с увеличением кислотности (табл. 3). В вариантах с 5–10 % NaCl в среде культивирования выявлено большое количество почкующихся клеток (до 20 %). Добавление 15–20 % NaCl приводило к сокращению почкующихся клеток (до 0 %), ингибированию метаболизма и гибели дрожжей. Обнаружены липидные

включения в клетках при различных концентрациях NaCl и значениях pH, что, очевидно, способствует процессу адаптации в условиях солевого стресса.

Отмечено, что при повышении концентрации NaCl в среде округлая в виде цветка форма колоний приобретает неправильный контур, поверхность становится бугристой, цвет в зависимости от варианта меняется от светло-бежевого до светло-коричневого, наблюдается уплотнение структуры. Размер колоний уменьшается до минимума (табл. 2) по сравнению с контролем (pH 4,5; 30 °С), при этом отмечается несколько больший диаметр колоний Y-503. Выявлена наибольшая толерантность обоих штаммов к солевому стрессу в нейтральной и щелочной области значений pH.

*Условия культивирования:* T=37 °С; pH 3,0; 4,5; 7,0; 9,0; 11,0; NaCl 5 %. Так как высокие концентрации NaCl (10–20 %) в среде культивирования оказывают негативное влияние на метаболизм дрожжей, нами изучен вариант в условиях повышенной температуры, широкого спектра pH и 5%-й NaCl (табл. 3). Округлая форма клеток DAW-3a не изменилась; клетки Y-503 в основном имели овально-округлую, в незначительном количестве – округлую и удлинённую форму.

Таблица 3

**Влияние различных значений pH и NaCl на средние размеры, мкм, и количество почкующихся клеток *S. cerevisiae* DAW-3a и Y-503 / Influence of different NaCl and pH values on the middle size,  $\mu\text{m}$ , and the number of budding cells of *S. cerevisiae* DAW-3a and Y-503**

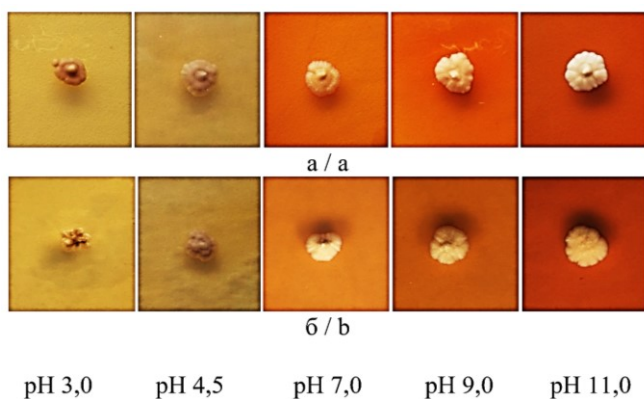
T, °C / NaCl, %	pH				
	3,0	4,5	7,0	9,0	11,0
37 / 5	$\frac{4 \times 4 \pm 0,2}{7 \times 5 \pm 0,3} / 14,1 / 14,5$	$\frac{5 \times 5 \pm 0,3}{10 \times 8 \pm 0,4} / 13,3 / 14,8$	$\frac{5 \times 5 \pm 0,3}{8 \times 6 \pm 0,3} / 12,9 / 13,1$	$\frac{5 \times 5 \pm 0,3}{7 \times 6 \pm 0,3} / 13,4 / 13,6$	$\frac{5 \times 5 \pm 0,3}{7 \times 6 \pm 0,3} / 13,1 / 13,5$
30 / 5	$\frac{4 \times 4 \pm 0,3}{7 \times 6 \pm 0,3} / 14,8 / 15,1$	$\frac{4 \times 4 \pm 0,3}{9 \times 7 \pm 0,3} / 18,1 / 19,8$	$\frac{4 \times 4 \pm 0,3}{8 \times 6 \pm 0,3} / 16,1 / 16,9$	$\frac{5 \times 5 \pm 0,3}{9 \times 8 \pm 0,3} / 14,9 / 15,8$	$\frac{5 \times 5 \pm 0,3}{8 \times 7 \pm 0,3} / 14,8 / 17,1$
30 / 10	$\frac{3 \times 3 \pm 0,2}{5 \times 4 \pm 0,3} / 14,9 / 15,1$	$\frac{3 \times 3 \pm 0,2}{6 \times 5 \pm 0,3} / 15,1 / 16,2$	$\frac{3 \times 3 \pm 0,2}{6 \times 5 \pm 0,3} / 15,1 / 16,6$	$\frac{4 \times 4 \pm 0,2}{6 \times 5 \pm 0,3} / 17,3 / 17,4$	$\frac{4 \times 4 \pm 0,2}{6 \times 5 \pm 0,3} / 16,2 / 16,5$
30 / 15	$\frac{2 \times 2 \pm 0,2}{3 \times 2 \pm 0,3} / \text{единицы} / \text{единицы}$	$\frac{2 \times 2 \pm 0,2}{3 \times 2 \pm 0,3} / \text{единицы} / \text{единицы}$	$\frac{2 \times 2 \pm 0,2}{3 \times 2 \pm 0,3} / 0,1 / 0,2$	$\frac{3 \times 3 \pm 0,2}{4 \times 3 \pm 0,3} / 0,2 / 0,2$	$\frac{3 \times 3 \pm 0,2}{4 \times 3 \pm 0,3} / 0,2 / 0,2$
30 / 20	$\frac{2 \times 2 \pm 0,2}{2 \times 2 \pm 0,2} / 0 / 0$	$\frac{2 \times 2 \pm 0,2}{3 \times 2 \pm 0,2} / 0 / 0$	$\frac{2 \times 2 \pm 0,2}{3 \times 2 \pm 0,2} / 0 / 0$	$\frac{2 \times 2 \pm 0,2}{3 \times 2 \pm 0,2} / 0 / 0$	$\frac{2 \times 2 \pm 0,2}{3 \times 2 \pm 0,2} / 0 / 0$

**Примечание:** средние размеры, мкм / почкующиеся клетки, %. DAW-3a – числитель Y-503 – знаменатель

По сравнению с контролем размеры клеток уменьшались. Обнаружено большое количество почкующихся клеток (до 15 %). Одновременное влияние нескольких стресс-факторов, в частности критических значений температуры, pH и NaCl,

могло привести к перекрестной адаптации, снижению вредных последствий и повышению толерантности дрожжей [12, 16]. Отмечалось, как и в других вариантах с NaCl, наличие липидных включений в цитоплазме.

Такие параметры гигантских колоний, как форма, поверхность, профиль и структура, в данных условиях сопоставимы с контролем. Цвет колоний изменился со светло-бежевого на более темный; отмечается появление розового пигмента, особенно в центре колоний DAW-3а. Сравнительный анализ размеров колоний исследуемых штаммов продемонстрировал их идентичность (рисунок). По сравнению с контролем обнаружено уменьшение размеров гигантских колоний; максимальный размер DAW-3а и отмечен в щелочной области значений pH, минимальный – при pH 3,0 (табл. 3).



Влияние 5 % NaCl, различных значений pH и температуры 37 °C на морфологию гигантских колоний *S. cerevisiae* DAW-3а (а) и Y-503 (б) / The influence of 5 % NaCl, different values of pH and 37 °C on the morphology of giant colonies *S. cerevisiae* DAW-3а (a) and Y-503 (b)

Таким образом, в результате сравнительного исследования морфологических параметров дрожжей *S. cerevisiae* DAW-3а и в условиях температурного, осмотического и pH-стресса установлено, что характерные особенности гаплоидного штамма DAW-3а – округлая форма клеток, полиплоидного штамма – разнообразие при доминирующей овально-округлой форме. Максимальные размеры клеток выявлены при pH 4,5 (30 °C), минимальные – при pH 3,0 (30 °C + повышенные концентрации NaCl в среде), при этом обнаружено преимущество Y-503. Во всех вариантах имеются включения гликогена, метахроматина, вкрапления липидных гранул, выявлено большое количество почкующихся клеток. В условиях солевого стресса наблюдается уменьшение числа почкующихся до единичных клеток в варианте с 15 % NaCl, их отсутствие – при 20 % NaCl.

Размеры гигантских колоний полиплоидного штамма в условиях различных значений pH и 30 °C существенно превышают данные параметры DAW-3а. При увеличении температуры и критических концентрациях NaCl в среде реакция штаммов на стресс идентична. Исследование толерантности *S.*

*cerevisiae* и к экстремальным факторам представляет интерес в связи с возможностью применения исследуемых штаммов в биотехнологических процессах.

## Литература

1. Brown A.J.P., Cowen L.E., Pietro A. Di., Quinn J. Stress adaptation // *Microbiol. Spectr.* 2017. Vol. 5 (4). P. 10. Doi 10.1128/microbiolspec.FUNK-0048-2016.
2. Borrull A., Lopez-Martínez G., Miro-Abella E., Salvado Z., Poblet M., Cordero-Otero R., Rozes N. New insights into the physiological state of *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol acclimation for producing sparkling wines // *Food Microbiology.* 2016. Vol. 54. P. 20–29.
3. Caspeta L., Nielsen J. Thermotolerant yeast strains adapted by Laboratory evolution show trade-off at ancestral temperatures and preadaptation to other stresses // *MBio.* 2015. Vol. 6 (4). P. 431–446. Doi 10.1128/mBio.00431-15.
4. Swinnen S., Henriques S., Shrestha R., Ho P.-W., Sá-Correia I., Nevoigt E. Improvement of yeast tolerance to acetic acid through Haal transcription factor engineering: towards the underlying mechanisms // *Microbial. Cell Factories.* 2017. Vol. 16. P. 7. Doi/10.1186/s12934-016-0621-5.
5. Serra-Cardona A., Canadell D., Ariño J. Coordinate responses to alkaline pH stress in budding yeast // *Microbial. Cell.* 2015. Vol. 2 (6). P. 182–196. Doi 10.15698/mic2015.06.205.
6. Секова В.Ю., Гесслер Н.Н., Исакова Е.П., Антипов А.Н., Дергачева Д.И., Дерябина Ю.И., Трубникова Е.В. Окислительно-восстановительный статус экстремофильных дрожжей *Yarrowia lipolytica* при адаптации к pH-стрессу // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2015. Т. 51, № 6. С. 570–577. Doi 10.7868/S0555109915060136.
7. Berterame N.M., Porro D., Ami D., Branduardi P. Protein aggregation and membrane lipid modifications under lactic acid stress in wild type and *OPI1* deleted *Saccharomyces cerevisiae* strains // *Microbial. Cell Factories.* 2016. Vol. 15 (39). P. 1–12. Doi 10.1186/s12934-016-0438-2.
8. Reis V.R., Antonangelo A.T.B.F., Bassi A.P.G., Colombi D., Ceccato-Antonini S. Bioethanol strains of *Saccharomyces cerevisiae* characterized by microsatellite and stress resistance // *Braz. J. Microbiol.* 2017. Vol. 48 (2). P. 268–274. Doi/10.1016/j.bjm.2016.09.017.
9. Viana N.C., Portugal C., Cruz S.H. Morphophysiological and molecular characterization of wild yeast isolates from industrial ethanol process // *African J. of Microbiology Research.* 2017. Vol. 11 (37). P. 1422–1430. Doi 10.5897/AJMR2017.8691.
10. Zemančíková J., Kodedová M., Papoušková K., Sychrová H. Four *Saccharomyces* species differ in their tolerance to various stresses though they have similar basic physiological parameters // *Folia Microbiol.* 2018. Vol. 63. P. 217–227. Doi/10.1007/s12223-017-0559-y.

11. Исламгагомедова Э.А., Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Гасанов Р.З., Аливердиева Д.А. Влияние экстремальных значений pH на морфологические особенности дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* // Изв. Самарского науч. центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 5 (2). С. 219–225.

12. Balakumar S., Arasaratnam V. Osmo-, thermo- and ethanol- tolerances of *Saccharomyces cerevisiae* S1 // Brazilian J. of Microbiology. 2012. Vol. 43 (1). P. 157–166. Doi 10.1590/S1517-838220120001000017.

13. Zdrag-Tecza R., Kwolek-Mirek M., Alabrudzińska M., Skoneczna A. Cell size influences the reproductive potential and total lifespan of the *Saccharomyces cerevisiae* yeast as revealed by the analysis of polyploid strains // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2018. P. 1–17. Doi /10.1155/2018/1898421.

14. Пат. 1284998 СССР. Штамм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, используемый в производстве хлебо-булочных изделий. 1987.

15. Аливердиева Д.А., Мамаев Д.В., Лагутина Л.С. Транспорт сукцината в клетки *Saccharomyces cerevisiae* после продолжительной холодной преинкубации // Прикладная биохимия и микробиология. 2009. Т. 45 (5). С. 577–585. Doi 10.1134/S0003683809050111.

16. Bubnová M., Zemančíkova J., Sychrova H. Osmotolerant yeast species differ in basic physiological parameters and in tolerance of non-osmotic stresses // Yeast. 2014. Vol. 31 (8). P. 309–321. Doi 10.1002/yea.3024.

#### References

1. Brown A.J.P., Cowen L.E., Pietro A. Di., Quinn J. (2017). Stress adaptation. *Microbiol. Spectr.*, vol. 5 (4), p. 10. Doi 10.1128/microbiolspec.FUNK-0048-2016.

2. Borrull A., Lopez-Martínez G., Miro-Abella E., Salvado Z., Poblet M., Cordero-Otero R., Rozes N. (2016). New insights into the physiological state of *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol acclimation for producing sparkling wines. *Food Microbiology*, vol. 54, pp. 20–29.

3. Caspeta L., Nielsen J. (2015). Thermotolerant yeast strains adapted by Laboratory evolution show trade-off at ancestral temperatures and preadaptation to other stresses. *MBio*, vol. 6 (4), pp. 431–446. Doi 10.1128/mBio.00431-15.

4. Swinnen S., Henriques S., Shrestha R., Ho P.-W., Sá-Correia I., Nevoigt E. (2017). Improvement of yeast tolerance to acetic acid through Haa1 transcription factor engineering: towards the underlying. *Microbial Cell Factories*, vol. 16, p. 7. Doi /10.1186/s12934-016-0621-5.

5. Serra-Cardona A., Canadell D., Ariño J. (2015). Coordinate responses to alkaline pH stress in budding yeast. *Microb Cell*, vol. 2 (6), pp. 182–196. Doi 10.15698/mic2015.06.205.

6. Sekova V.Yu., Gessler N.N., Isakova E.P., Antipov A.N., Dergacheva D.I., Deryabina Yu.I., Trubnikova

E.V. (2015). Oxidative-reduction status of the extremophilic yeast *Yarrowia lipolytica* during adaptation to pH stress. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, vol. 51, No. 6, pp. 570–577. Doi 10.7868/S0555109915060136. (in Russian).

7. Berterame N.M., Porro D., Ami D., Branduardi P. (2016). Protein aggregation and membrane lipid modifications under lactic acid stress in wild type and *OP11* deleted *Saccharomyces cerevisiae* strains. *Microbial. Cell Factories*, vol. 15 (39), pp. 1–12. Doi 10.1186/s12934-016-0438-2.

8. Reis V.R., Antonangelo A.T.B.F., Bassi A.P.G., Colombi D., Ceccato-Antonini S. (2017). Bioethanol strains of *Saccharomyces cerevisiae* characterized by microsatellite and stress resistance. *Braz. J. Microbiol.*, vol. 48 (2), pp. 268–274. Doi /10.1016/j.bjm.2016.09.017.

9. Viana N.C., Portugal C., Cruz S.H. (2017). Morphophysiological and molecular characterization of wild yeast isolates from industrial ethanol process. *African Journal of Microbiology Research*, vol. 11 (37), pp. 1422–1430. Doi 10.5897/AJMR2017.8691.

10. Zemančíkova J., Kodedova M., Papoušková K., Sychrova H. (2018). Four *Saccharomyces* species differ in their tolerance to various stresses though they have similar basic physiological parameters. *Folia Microbiol.*, vol. 63, pp. 217–227. Doi /10.1007/s12223-017-0559-y.

11. Islammagomedova E.A., Halilova E.A., Kotenko S.C., Gasanov R.Z., Aliverdieva D.A. (2018). Influence of extreme pH values on morphological characteristics of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiiskoi akademii nauk*, vol. 20, No. 5 (2), pp. 219–225. (in Russian).

12. Balakumar S., Arasaratnam V. (2012). Osmo-, thermo- and ethanol- tolerances of *Saccharomyces cerevisiae* S1. *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 43 (1), pp. 157–166. Doi 10.1590/S1517-838220120001000017.

13. Zdrag-Tecza R., Kwolek-Mirek M., Alabrudzińska M., Skoneczna A. (2018). Cell size influences the reproductive potential and total lifespan of the *Saccharomyces cerevisiae* yeast as revealed by the analysis of polyploid strains. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, pp. 1–17. Doi /10.1155/2018/1898421.

14. Certificate 1284998 SSSR. The strain of yeast of *Saccharomyces cerevisiae*, used in the production of bakery products. (1987). (in Russian).

15. Aliverdieva D.A., Mamaev D.V., Lagutina L.S. (2009). Transport of succinate into *Saccharomyces cerevisiae* cells after prolonged cold preincubation. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, vol. 45, No. 5, pp. 577–585. Doi 10.1134/S0003683809050111. (in Russian).

16. Bubnová M., Zemančíkova J., Sychrova H. (2014). Osmotolerant yeast species differ in basic physiological parameters and in tolerance of non-osmotic stresses. *Yeast*, vol. 31 (8), pp. 309–321. Doi 10.1002/yea.3024.

УДК 579.843.1:57.083,13:579.843.2

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-119-125

## ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ШТАММОВ ХОЛЕРНОГО ВИБРИОНА ОТ МИКРООРГАНИЗМОВ – ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА AEROMONAS С ПОМОЩЬЮ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ «АРГИНИН – ЖЕЛЕЗО – САХАРОЗНЫЙ АГАР»

© 2021 г. А.Б. Мазрухо<sup>1</sup>, Д.И. Каминский<sup>1</sup>, В.В. Лобанов<sup>1</sup>, Д.В. Соков<sup>1</sup>, И.В. Архангельская<sup>1</sup>,  
М.И. Ежова<sup>1</sup>, Д.А. Левченко<sup>1</sup>, М.М. Сагакянц<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, Ростов-на-Дону, Россия

## DIFFERENTIATION OF CHOLERA VIBRIO STRAINS FROM MICROORGANISMS - REPRESENTATIVES OF THE GENUS AEROMONAS USING THE NUTRITIONAL MEDIUM "ARGININE-IRON-SUGAR AGAR"

A.B. Mazrukho<sup>1</sup>, D.I. Kaminsky<sup>1</sup>, V.V. Lobanov<sup>1</sup>, D.V. Sokov<sup>1</sup>, I.V. Arkhangel'skaya<sup>1</sup>,  
M.I. Ezhova<sup>1</sup>, D.A. Levchenko<sup>1</sup>, M.M. Sagakyants<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Rostov-on-Don, Russia

Мазрухо Алексей Борисович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория питательных сред, Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: plague@aaanet.ru

Alexey B. Mazrukho - Candidate of Medicine, Leading Researcher, Laboratory of Nutrient Media, Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: plague@aaanet.ru

Каминский Денис Игоревич – научный сотрудник, лаборатория питательных сред, Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: plague@aaanet.ru

Denis I. Kaminsky - Researcher, Laboratory of Nutrient Media, Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: plague@aaanet.ru

Лобанов Владимир Владимирович – доктор медицинских наук, старший научный сотрудник, лаборатория питательных сред, Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: plague@aaanet.ru

Vladimir V. Lobanov - Doctor of Medicine, Senior Researcher, Laboratory of Nutrient Media, Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: plague@aaanet.ru

Соков Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник, лаборатория питательных сред, Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: plague@aaanet.ru

Dmitry V. Sokov - Junior Researcher, Laboratory of Nutrient Media, Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: plague@aaanet.ru

Архангельская Ирина Викторовна – кандидат медицинских наук, научный сотрудник, лаборатория микробиологии холеры, Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: plague@aaanet.ru

Irina V. Arkhangel'skaya - Candidate of Medicine, Researcher, Laboratory of Cholera Microbiology, Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: plague@aaanet.ru

Ежова Мария Ивановна – научный сотрудник, лаборатория микробиологии холеры, Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: plague@aaanet.ru

Maria I. Ezhova - Researcher, Laboratory of Cholera Microbiology, Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: plague@aaanet.ru

Левченко Дарья Александровна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, лаборатория микробиологии холеры, Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: plague@aaanet.ru

Darya A. Levchenko - Candidate of Medicine, Senior Researcher, Laboratory of Cholera Microbiology, Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: plague@aaanet.ru

Сагакянц Маргарита Мартиросовна – младший научный сотрудник, музей живых культур, Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, ул. М. Горького, 117/40, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия, e-mail: plague@aaanet.ru

Margarita M. Sagakyants - Junior Researcher, Museum of Living Cultures, Rostov-on-Don Anti-Plague Institute, Rospotrebnadzor, Gorkogo St., 117/40, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: plague@aaanet.ru

Проведено исследование возможности использования разработанной питательной среды «Аргинин – железо – сахарозный агар» для дифференциации штаммов холерного вибриона различного происхождения от микроорганизмов – представителей рода *Aeromonas*. Полученные результаты позволяют рассматривать применение данной среды как перспективное направление решения проблемы дифференциации штаммов *V. cholerae* от близкородственных аэромонад на этапах отбора подозрительных колоний со щелочного агара, дифференциальных агаризованных сред типа TCBS и отбора культур для дальнейшей идентификации. Разработанная среда может быть рекомендована для бактериологических лабораторий территориального уровня, проводящих мониторинговые исследования на холеру.

**Ключевые слова:** холерный вибрион, аэромонады, питательные среды, первичная идентификация.

The study of the possibility of using the developed nutrient medium "Arginine-iron-sucrose agar" for the differentiation of *Vibrio cholerae* strains of various origins from microorganisms of the genus *Aeromonas* was carried out. The results obtained allow us to consider the use of this medium as a promising direction for solving the problem of differentiation of *V. cholerae* strains from closely related aeromonads at the stages of selecting suspicious colonies from alkaline agar and differential agarized media of the TCBS type and selecting cultures for further identification. The developed environment can be recommended for bacteriological laboratories at the territorial level conducting monitoring studies for cholera.

**Keywords:** *Vibrio cholerae*, aeromonads, culture media, primary identification.

## Введение

Регламентированная действующими МУК 4.2.2218-07 [1] схема лабораторного исследования на холеру предусматривает использование на IV (отбор подозрительных на холерный вибрион колоний в посевах на плотные среды нативного материала, а также в посевах из 1-й и 2-й сред накопления) и V (отбор культур для идентификации) этапах полиуглеводных сред. Среди них наиболее широкое применение нашли среды лактозо-, маннозо-сахарозная, а также классические полиуглеводные [2–4]. В основе отбора подозрительных колоний с помощью этих сред для последующей идентификации лежат способность вибрионов ферментировать глюкозу и сахарозу со сдвигом pH среды в кислую сторону вследствие накопления молочной, янтарной и уксусной кислот [5] без газообразования, отсутствие способности к ферментации лактозы и продукции сероводорода. Недостатком всех применяемых в лабораторной диагностике холеры полиуглеводных сред является отсутствие возможности отбора с их помощью подозрительных колоний по какому-либо специфическому критерию, при-

сущему исключительно роду *Vibrio*. В этом аспекте невозможна дифференциация с помощью полиуглеводных сред колоний микроорганизмов рода *Vibrio* от представителей близкородственных глюкозо- и сахарозопозитивных микроорганизмов (например, рода *Aeromonas*) [6–10]. Наряду с полиуглеводными средами для отбора культур с целью их последующей идентификации в арсенале лабораторий территориального уровня имеются также сыворотки холерные диагностические для слайд-агглютинации и тесты на оксидазу. Однако используемые для слайд-агглютинации поликлональные иммунные сыворотки могут вступать в перекрестные реакции с гетерологичными микроорганизмами [11], а оксидазоположительными являются не только штаммы, относящиеся к роду *Vibrio*, но и близкородственные микроорганизмы, например, рода *Aeromonas* [12], которые достаточно широко распространены в воде поверхностных водоёмов, сточных водах и донных отложениях [8]. При исследовании видового состава микробиоценоза поверхностных водоёмов г. Ростова-на-Дону (реки Дон и Темерник) была выявлена круглогодичная циркуляция аэромонад; их обнаружение в тёплое

время года шло совместно с *V. cholerae non O1/non O139* [6]. В Вислинском заливе во все сезоны доминировали условно-патогенные бактерии родов *Aeromonas* и *Pseudomonas* [13].

Представители рода *Aeromonas* близки к микроорганизмам рода *Vibrio* по метаболизму, экологической нише, условиям существования; характеризуются морфологически сходными с вибрионами колониями на щелочном агаре. Аэромонады, как и штаммы вибрионов, обладают способностью ферментировать сахарозу, вследствие чего образуют сходные жёлтые колонии на селективно-дифференциальных средах типа СЭДХ и ТСБС. В результате для последующей идентификации зачастую отбирают культуры сахарозопозитивных микроорганизмов, не всегда относящихся к роду *Vibrio*, например штаммы микроорганизмов рода *Aeromonas*. Это увеличивает объём исследований на следующем, VI этапе лабораторной диагностики холеры.

Предлагаемая нами вместо полиуглеводных сред питательная среда «Аргинин – железо – сахарозный агар» способна выявлять сразу два значимых признака принадлежности штаммов, формирующих подозрительные колонии, к микроорганизмам рода *Vibrio* (ферментация сахарозы и отсутствие дегидролазы аргинина). Также она позволяет отличить их от аэромонад, которые обладают способностью ферментировать аргинин. Использование разработанной среды позволит повысить эффективность отбора подозрительных колоний, что сократит объём исследований на следующем этапе – при идентификации выделенных культур.

Предлагаемая питательная среда может быть использована при исследовании материалов из объектов окружающей среды и от людей.

Цель настоящей работы – изучение дифференцирующих свойств питательной среды «Аргинин – железо – сахарозный агар» в отношении различных штаммов холерного вибриона и микроорганизмов – представителей рода *Aeromonas*.

### Материалы и методы

В исследовании использованы 19 штаммов холерного вибриона из коллекции Музея живых культур ФКУЗ Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора:

1. *V. cholerae O1 classical* P-1 (145) Inaba (*ctx+*, *tcp+*), тест-штамм для контроля питательных сред.
2. *V. cholerae O1 El Tor* M-878 (*ctx+*, *tcp+*), тест-штамм для контроля питательных сред.
3. *V. cholerae O1 El Tor* 90 (19764) Ogawa (*ctx-*, *tcp-*), выделен из р. Дон (Ростов-на-Дону) в 2015 г.
4. *V. cholerae O1 El Tor* 16078 Ogawa (*ctx+*), выделен от больного.

5. *V. cholerae O1 El Tor* 19923 Ogawa (*ctx+*, *tcp-*), выделен из р. Темерник (Ростов-на-Дону) в 2016 г.

6. *V. cholerae O1 El Tor* 19925 Ogawa (*ctx-*, *tcp-*), выделен из р. Темерник (Ростов-на-Дону) в 2016 г.

7. *V. cholerae O1 El Tor* Ogawa 18983 (*ctx-*, *tcp-*), выделен из р. Мацеста (Сочи) в 2007 г.

8. *V. cholerae O1 El Tor* Ogawa 18984 (*ctx-*, *tcp-*), выделен из р. Агура (Сочи) в 2007 г.

9. *V. cholerae O1 El Tor* Ogawa 19813 (*ctx-*, *tcp-*), выделен от больного на Украине, Донецкая область, Мариуполь, в 1998 г.

10. *V. cholerae O139 MO45* (16077) (*ctx+*, *tcp+*), выделен из поверхностного водоёма в Индии в 1991 г.

11. *V. cholerae O139* 16063 (*ctx+*, *tcp+*), выделен от больного в Ростове-на-Дону в 1993 г.

12. *V. cholerae O139* 16064 (*ctx+*, *tcp+*), выделен от больного в Ростове-на-Дону в 1993 г.

13. *V. cholerae O139* 16065 (*ctx+*, *tcp+*), выделен от больного в Ростове-на-Дону в 1993 г.

14. *V. cholerae O139* 17788 (*ctx-*, *tcp-*), выделен из р. Обь в 1998 г.

15. *V. cholerae O139* 17916 (*ctx-*, *tcp-*), выделен из р. Элистинка (Элиста) в 1999 г.

16. *V. cholerae O139* 17919 (*ctx-*, *tcp-*), выделен из р. Дон (Ростов-на-Дону) в 1999 г.

17. *V. cholerae O139* 18954 (*ctx-*, *tcp-*), выделен из р. Москва (Москва) в 2006 г.

18. *V. cholerae non O1/ non O139* P-9741 (*ctx-*, *tcp-*) – тест-штамм для контроля питательных сред.

19. *V. cholerae non O1/ non O139* O62 2810/291 (16002) (*ctx+*, *tcp+*), выделен от больного в Узбекистане в 1971 г.

Для оценки дифференцирующих свойств опытной и контрольной сред отобраны 5 штаммов микроорганизмов – представителей рода *Aeromonas* из коллекции Музея живых культур ФКУЗ Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора: *A. caviae* P-6020, *A. caviae* P-6048, *A. caviae* P-6051, *A. hydrophila* P-6052, *A. veronii* P-6096. Эти штаммы выделены из объектов окружающей среды.

Опытная среда «Аргинин – железо – сахарозный агар» имела следующий состав, г/л:

- пептон сухой ферментативный (ГОСТ 13805-76), 1,0;
- натрий хлористый ЧДА (ГОСТ 4233-77), 5,0;
- L-аргинин солянокислый ЧДА (ТУ 6-09-2100-78), 13,0;
- сахароза ЧДА (ГОСТ 5833-75, изм. 3), 1,0;
- натрий серноватисто-кислый 5-водный ЧДА (ГОСТ 27068-86), 0,3;
- соль закиси железа и аммония двойная сернокислая 6-водная (соль Мора) ЧДА (ГОСТ 4208-72, изм. 2), 0,2;

– калий фосфорнокислый двузамещенный 3-водный ЧДА (ГОСТ 2493-75, изм. 2), 0,3;

– агар-агар микробиологический (ГОСТ 17206-96), 12,0;

– бромтимоловый синий водорастворимый ЧДА (ТУ 6-09-07-1602-87), 0,03 (в виде 1,6%-го спиртового раствора, 1,88 мл);

– крезоловый красный водорастворимый ЧДА (ТУ 6-09-769-76), 0,005 (в виде 0,1%-го спиртового раствора, 5 мл);

– вода дистиллированная (ГОСТ 6709-72), до 1,0 л;

– pH среды 6,7.

В качестве контрольных питательных сред использовали два набора реагентов для бактериологических исследований: «Питательная среда для идентификации энтеробактерий сухая» («Агар Клиглера-ГРМ»), ФБУН ГНЦ ПМБ, п. Оболенск, регистрационное удостоверение № ФСР 2007/00968 от 13.10.2011, серия 396, годен до 06.2021; «Среда Гисса-ГРМ с сахарозой», ФБУН ГНЦ ПМБ, п. Оболенск, регистрационное удостоверение № ФСР 2008/03494 от 13.10.2011, серия О18-К-2, годна до 06.2021), а также питательную среду «Декарбоксилазный бульон Мёллера с аргинином», HiMedia Ltd., Индия, каталожный номер M689-100G, серия 0000371105, годен до 31.12.2023. Каждую питательную среду готовили по инструкции производителя.

Подготовку культур к исследованию осуществляли следующим методом. Штаммы *V. cholerae*, *A. hydrophila*, *A. caviae*, *A. veronii*, хранящиеся на 0,3%-м агаре Мартена pH 7,8, высевали в пробирки с 5 мл 1%-й пептонной воды pH 7,8 или бульона Мартена (мясо-пептонного бульона) pH 7,8 и инкубировали при температуре  $(37\pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 3–5 ч, после чего осуществляли высев культуры с поверхности среды бактериологической петлей № 2 на чашки с агаром Мартена pH 7,8 для получения изолированных колоний (I пассаж). Через 18–20 ч культивирования при  $(37\pm 1)^\circ\text{C}$  с поверхности агара отбирали типичные по морфологии колонии холерного вибриона, аэромонад и пересевали их бактериологической петлей № 2 на чашки с агаром Мартена pH 7,8, инкубировали при температуре  $(37\pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 3–5 ч (II пассаж), затем использовали для посева на опытную и контрольные питательные среды.

Посев каждого штамма на опытную и контрольные среды с агаровых пластинок после II пассажа проводили бактериологической петлей № 2. На «Аргинин – железо – сахарозный агар» рассеивали по одной полной петле культуры сначала на скошенную часть, затем уколом в «столбик» среды (в

пробирке). Используемые в настоящей работе культуры микроорганизмов засеивали на контрольные питательные среды («Агар Клиглера-ГРМ», «Среда Гисса-ГРМ с сахарозой», «Декарбоксилазный бульон Мёллера с аргинином») согласно инструкции по применению для каждой из них.

Посевы на опытной и контрольных средах инкубировали при температуре  $(37\pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 24 ч, по истечении которых проводили учёт результатов. Оценивали дифференцирующие свойства опытной и контрольных сред в отношении отобранных для исследования штаммов *V. cholerae* и аэромонад.

Статистическую обработку результатов проводили путём определения коэффициента вариации исследуемого показателя в повторных экспериментах в соответствии с рекомендациями Л.С. Каминского [14]. При этом результат определения качественного показателя «дифференцирующие свойства», соответствующий нормативу на опытную и контрольные среды, выражали цифрой 1 (один). Отклонение указанного показателя от норматива обозначали как 0 (ноль).

## Результаты и обсуждение

Проведенное исследование, результаты которого представлены в таблице, продемонстрировало, что использование питательной среды «Аргинин – железо – сахарозный агар» позволяет достоверно дифференцировать штаммы холерного вибриона от штаммов – представителей рода *Aeromonas* по признаку ферментации аргинина. Все использованные штаммы холерного вибриона O1 и не O1/не O139 серогрупп вызывали изменение цвета скошенной части и «столбика» опытной среды (в пробирках) от исходного зелёного в жёлтый при температуре  $37^\circ\text{C}$  за 24 ч. Это свидетельствует о том, что данные штаммы ферментируют сахарозу с образованием кислых продуктов, не обладают дегидролазой аргинина и не образуют сероводород. Все взятые в опыт водные штаммы *V. cholerae* O139 через 24 ч культивирования при температуре  $37^\circ\text{C}$  вызывали не столь значительное пожелтение скошенной части и «столбика» опытной среды (цвет был жёлто-зелёным), как штамм *V. cholerae* O139 16064, изолированный от больного (цвет всей среды – жёлтый). Подобный феномен обнаружен нами впервые и не выявлялся ни на какой другой известной питательной среде для идентификации холерного вибриона по признакам ферментации углеводов и аминокислот. Это может свидетельствовать о более низком уровне ферментативной активности водных штаммов холерного вибриона O139 серовара в отношении сахарозы по сравнению со штаммами, выделенными от людей.

**Результаты изучения дифференцирующих свойств опытной и контрольных питательных сред в отношении штаммов холерного вибриона и аэромонад (время культивирования – 24 ч)  
/ Results of studying the differentiating properties of experimental and control nutrient media in relation to strains of *Vibrio cholerae* and aeromonads (cultivation time - 24 hours)**

Микроорганизм	Опытная среда «Аргинин – железо – сахарозный агар»		Контрольные питательные среды			
	Скошенная часть	Столбик	Агар Клиглера-ГРМ		Среда Гисса-ГРМ с сахарозой	Декарбоксилазный бульон Мёллера с аргинином
			Скошенная часть	Столбик		
<i>V. cholerae</i> O1 ( <i>Classical</i> и <i>El Tor</i> ) – 9 штаммов	Жёлтый	Жёлтый	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Жёлтый
<i>V. cholerae</i> O139 (выделены из водных источников) – 5 штаммов	Жёлто-зелёный	Жёлто-зелёный	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Жёлтый
<i>V. cholerae</i> O139 (выделены от больных) – 3 штамма	Жёлтый	Жёлтый	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Жёлтый
<i>V. cholerae</i> non O1/ non O139 – 2 штамма	Жёлтый	Жёлтый	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Жёлтый
<i>A. caviae</i> P-6020	Синий	Синий	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Сине-фиолетовый
<i>A. caviae</i> P-6048	Синий	Синий	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Сине-фиолетовый
<i>A. caviae</i> P-6051	Синий	Жёлтый	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Сине-фиолетовый
<i>A. hydrophila</i> P-6052	Синий	Синий	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Сине-фиолетовый
<i>A. veronii</i> P-6096	Синий	Синий	Красный	Жёлтый	Жёлтый	Сине-фиолетовый

Возможно, использование разработанной питательной среды является инструментом для фенотипической дифференциации штаммов внутри O139-серогруппы. Данное обстоятельство требует дальнейшего изучения.

Штаммы аэромонад при их культивировании на опытной среде «Аргинин – железо – сахарозный агар» характеризовались способностью к ферментации как сахарозы, так и аргинина (за счет наличия его дегидролазы). С 10–12-го ч от начала культивирования при 37 °С доминировало накопление щелочных продуктов вследствие ферментации аргинина, что проявлялось изменением цвета среды от исходного зеленого через пожелтение с 6-го по 9-й ч (вследствие ферментации сахарозы) к синему. Скошенная часть опытной среды при культивировании всех взятых в исследование штаммов микроорганизмов – представителей рода *Aeromonas* через 12 ч окрашивалась в синий цвет. «Столбик» опытной среды к этому времени становился синим у четырех из пяти штаммов *Aeromonas*. Штамм *A. caviae* P-6051, вероятно, характеризуется более выраженной ферментативной активностью в отношении сахарозы или сниженной дегидролазной активностью.

На контрольных питательных средах «Агар Клиглера-ГРМ» и Гисса-ГРМ с сахарозой различий между штаммами холерного вибриона и аэромонад не регистрировалось. Все исследованные штаммы *V. cholerae* и *Aeromonas* при культивировании в течение 24 ч при 37 °С на агаре Клиглера-ГРМ вы-

зывали изменение цвета «столбика» среды от исходного красного к жёлтому вследствие ферментации входящей в состав среды глюкозы. Цвет скошенной части этой среды (в пробирках) оставался красным из-за отсутствия способности *V. cholerae* и бактерий рода *Aeromonas* ферментировать лактозу, входящую в рецептуру данной среды. На среде Гисса-ГРМ с сахарозой все взятые в работу штаммы как холерного вибриона, так и аэромонад в тех же условиях меняли окраску среды от первоначальной зелёной к жёлтой за счёт ферментации сахарозы с образованием кислых продуктов.

На контрольной питательной среде – декарбоксилазном бульоне Мёллера с аргинином между взятыми в исследование штаммами *V. cholerae* и представителями рода *Aeromonas* при культивировании в условиях 37 °С, 24 ч выявлялись различия. Культуры холерного вибриона вызывали изменение окраски этой среды от сиреневой до жёлтой из-за ферментации глюкозы с образованием кислых продуктов. Штаммы *A. caviae* P-6020, *A. caviae* P-6048, *A. caviae* P-6051, *A. hydrophila* P-6052, *A. veronii* P-6096 меняли цвет вышеуказанной среды от сиреневого к сине-фиолетовому за счёт образования продуктов щелочного характера при ферментации аргинина.

Вариация показателя «дифференцирующие свойства» опытной и контрольной сред при его повторных определениях не регистрировалась.

Таким образом, при использовании разработанной питательной среды «Аргинин – железо – саха-

розный агар» возможно осуществлять первичную идентификацию штаммов холерного вибриона (на этапе отбора подозрительных колоний в посевах на плотные питательные среды нативного материала и материала, прошедшего через среды обогащения), а также дифференциацию *V. cholerae* от близкородственных микроорганизмов рода *Aeromonas* одновременно по двум признакам: ферментации сахарозы и отсутствию дегидролазы аргинина. Широко применяемая в микробиологической практике, в том числе лабораторной диагностике холеры на этапе отбора подозрительных колоний, среда «Агар Клиглера-ГРМ» не позволяет осуществлять дифференциацию данных микроорганизмов, так как в её принципе действия не заложено выявление способности исследуемых штаммов к ферментации сахарозы и аргинина.

Среды Гисса с сахарозой и Мёллера с аргинином позволяют выявлять только один признак отнесения исследуемых микроорганизмов к вибрионам или аэромонадам. Эти среды используются при окончательной идентификации выделенных культур, но не на этапе отбора подозрительных колоний.

Различия в ферментативной активности в отношении сахарозы водных и выделенных от человека штаммов холерного вибриона O139 серогруппы, выявляемые на предлагаемой среде «Аргинин – железо – сахарозный агар», безусловно, требуют дальнейшего изучения с использованием широкого набора различных по происхождению штаммов эпидемически значимого серовара «Бенгал».

Внедрение в практику лабораторной диагностики холеры (прежде всего, мониторинговых исследований воды поверхностных водоёмов на наличие этого возбудителя) питательной среды «Аргинин – железо – сахарозный агар», не имеющей в настоящее время аналогов, может рассматриваться как перспективное направление решения проблемы дифференциации штаммов *V. cholerae* от близкородственных аэромонад на этапах отбора подозрительных колоний со щелочного агара и дифференциальных агаризованных сред типа TCBS, а также отбора культур для дальнейшей идентификации. Разработанная среда прошла технические и клинические испытания на базе аккредитованного испытательного центра, по результатам которых получено положительное заключение, а также процедуру государственной регистрации в качестве изделия медицинского назначения. Получено регистрационное удостоверение от 3 июня 2020 г. № РЗН 2020/10543. Приказом Росздравнадзора от 03.06.2020 № 4635 питательная среда «Аргинин – железо – сахарозный агар» допущена к обращению на территории Российской Федерации.

## Выводы

1. Питательная среда «Аргинин – железо – сахарозный агар» позволяет осуществлять дифференциацию штаммов холерного вибриона от микроорганизмов – представителей рода *Aeromonas* на этапе отбора подозрительных колоний в посевах на плотные среды нативного материала, а также материала, прошедшего через среды обогащения, при проведении лабораторной диагностики холеры.

2. Использование питательной среды «Аргинин – железо – сахарозный агар» является эффективным способом первичной идентификации холерного вибриона сразу по двум значимым критериям: ферментации сахарозы и отсутствию дегидролазы аргинина.

3. Предлагаемая питательная среда «Аргинин – железо – сахарозный агар» может рассматриваться в качестве перспективной альтернативы используемым в практике лабораторной диагностики холеры полиуглеводным средам: Клиглера, Ресселя, лактозо-сахарозной, маннозо-сахарозной.

## Литература

1. МУК 4.2.2218-07. Лабораторная диагностика холеры. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2007. 87 с.

2. Russel F.F. The isolation of typhoid bacilli from urine and feces with the description of a new double sugar tube medium // J. Med. Res. 1911. Vol. 25. P. 217.

3. Kligler I.J. A simple medium for the differentiation of members of the typhoid-paratyphoid group // Am. J. Public Health. 1917. Vol. 7. P. 1042–1044.

4. Kligler I.J. Modifications of culture media used in the isolation and differentiation of typhoid, dysentery and allied bacilli // J. Exp. Med. 1918. Vol. 28. P. 319–322.

5. Адамов А.К., Наумшина М.С. Холерные вибрионы. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1984. 328 с.

6. Меньшикова Е.А., Курбатова Е.М., Левченко Д.А. и др. Количественные и качественные изменения микробиоценоза водоёмов г. Ростова-на-Дону в течение года // Холера и патогенные для человека вибрионы: материалы совещания специалистов Роспотребнадзора. Ростов н/Д., 2018. Вып. 31. С. 86–89.

7. Erdem B., Kariptas E., Cil E., Isik K. Biochemical identification and numerical taxonomy of *Aeromonas* spp. isolated from food samples in Turkey // Turk. J. Biol. 2011. Vol. 35, № 1. P. 463–472.

8. Abbott S.L., Cheung W.K.W., Janda J.M. The Genus *Aeromonas*: Biochemical Characteristics, Atypical Reactions, and Phenotypic Identification Schemes // J. of Clin. Microbiol. 2003. Vol. 41, № 6. P. 2348–2357.

9. Pazzaglia G., Sack R.B., Salazar E. et al. High Frequency of Coinfecting Enteropathogens in *Aeromonas*-Associated Diarrhea of Hospitalized Peruvian

Infants // *J. of Clin. Microbiol.* 1991. Vol. 29. № 6. P. 1151–1156.

10. Janda J.M., Abbott S.L. The Genus *Aeromonas*: Taxonomy, Pathogenicity, and Infection // *Clin. Microbiol. Rev.* 2010. Vol. 23, № 1. P. 35–73.

11. Кретенчук О.Ф. Разработка новых препаратов на основе моноклональных антител для диагностики холерных вибрионов O1, O139 серогрупп ускоренными методами : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ставрополь, 2014. 22 с.

12. Куклина Н.Г., Горшков И.Г., Викторов Д.А., Васильев Д.А. Конструирование питательных сред для выделения и индикации бактерий рода *Aeromonas* // *Вестн. ветеринарии.* 2013. № 1 (64). С. 75–77.

13. Авдеева Е.В., Казимирченко О.В. Мониторинг состояния европейского угря *Anguilla anguilla* L. Вислинского (Калининградского) залива по бактериологическим параметрам // *Фундаментальные исследования.* 2005. № 8. С. 50–51.

14. Каминский Л.С. Статистическая обработка лабораторных и клинических данных. Л.: Медицина, 1964. С. 112–113.

#### References

1. MUK 4.2.2218-07. *Laboratory diagnostics of cholera.* (2007). Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Press, 87 p. (in Russian).

2. Russel F.F. (1911). The isolation of typhoid bacilli from urine and feces with the description of a new double sugar tube medium. *J. Med. Res.*, vol. 25, p. 217.

3. Kligler I.J. (1917). A simple medium for the differentiation of members of the typhoid-paratyphoid group. *Am. J. Public Health*, vol. 7, pp. 1042-1044.

4. Kligler I.J. (1918). Modifications of culture media used in the isolation and differentiation of typhoid, dysentery and allied bacilli. *J. Exp. Med.*, vol. 28, pp. 319-322.

5. Adamov A.K., Naumshina M.S. (1984). *Cholera vibriions.* Saratov, Saratov University Press, 328 p. (in Russian).

6. Menshikova E.A., Kurbatova E.M., Levchenko D.A. et al. (2018). Quantitative and qualitative changes in the microbiocenosis of reservoirs in Rostov-on-Don during the year. *Cholera and pathogenic vibriions for humans.* Materials of the Meeting of Rospotrebnadzor specialists. Rostov-on-Don, vol. 31, pp. 86-89. (in Russian).

7. Erdem B., Kariptas E., Cil E., Isik K. (2011). Biochemical identification and numerical taxonomy of *Aeromonas* spp. isolated from food samples in Turkey. *Turk. J. Biol.*, vol. 35, No. 1, pp. 463-472.

8. Abbott S.L., Cheung W.K.W., Janda J.M. (2003). The Genus *Aeromonas*: Biochemical Characteristics, Atypical Reactions, and Phenotypic Identification Schemes *J. of Clin. Microbiol.*, vol. 41, No. 6, pp. 2348-2357.

9. Pazzaglia G., Sack R.B., Salazar E. et al. (1991). High Frequency of Coinfecting Enteropathogens in *Aeromonas*-Associated Diarrhea of Hospitalized Peruvian Infants. *J. of Clin. Microbiol.*, vol. 29, No. 6, pp. 1151-1156.

10. Janda J.M., Abbott S.L. (2010). The Genus *Aeromonas*: Taxonomy, Pathogenicity, and Infection. *Clin. Microbiol. Rev.*, vol. 23, No. 1, pp. 35-73.

11. Kretenchuk O.F. (2014). *Development of new drugs based on monoclonal antibodies for diagnostics of cholera vibriions O1, O139 serogroups by accelerated methods.* Dissertation Thesis. Stavropol, 22 p. (in Russian).

12. Kuklina N.G., Gorshkov I G., Viktorov D.A., Vasiliev D.A. (2013). Design of nutrient media for isolation and indication of bacteria of the genus *Aeromonas*. *Vestnik veterinarii*, No. 1 (64), pp. 75-77. (in Russian).

13. Avdeeva E.V., Kazimirchenko O.V. (2005). Monitoring the state of the European eel *Anguilla anguilla* L. Vislinsky (Kaliningrad) Bay on bacteriological parameters. *Fundamental nye issledovaniya*, No. 8, pp. 50-51. (in Russian).

14. Kaminsky L.S. (1964). *Statistical treatment laboratory and clinical data.* Leningrad, Meditsina Publ., pp. 112-113. (in Russian).

УДК 57.044; 631.46

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-126-133

## ОЦЕНКА ЭКОТОКСИЧНОСТИ ВИСМУТА ПО АКТИВНОСТИ КАТАЛАЗЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ И БУФЕРНОСТИ ПОЧВ\*

© 2021 г. Л.В. Судьина<sup>1</sup>, С.И. Колесников<sup>1</sup>, Т.В. Минникова<sup>1</sup>,  
Т.А. Тер-Мисакянц<sup>1</sup>, Е.Н. Неведомая<sup>1</sup>, К.Ш. Казеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

## ESTIMATION OF ECOTOXICITY OF BISMUTH BY CATALASE ACTIVITY DEPENDING ON THE CHEMICAL COMPOUNDS AND BUFFER SOILS

L.V. Sudina<sup>1</sup>, S.I. Kolesnikov<sup>1</sup>, T.V. Minnikova<sup>1</sup>,  
T.A. Ter-Misakyants<sup>1</sup>, E.N. Nevedomaya<sup>1</sup>, K.Sh. Kazeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Судьина Людмила Владимировна – аспирант, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: malusik\_07@inbox.ru

Lyudmila V. Sudina - Postgraduate, Department of Ecology and Environmental Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: malusik\_07@inbox.ru

Колесников Сергей Ильич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru

Sergey I. Kolesnikov - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of Department of Ecology and Environmental Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru

Минникова Татьяна Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, НОЦ «Экология и природопользование», Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: loko261008@yandex.ru

Tatiana V. Minnikova - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, SEC "Ecology and Nature Management", Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: loko261008@yandex.ru

Тер-Мисакянц Тигран Александрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, НОЦ «Экология и природопользование», Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: rak@bk.ru

Tigran A. Ter-Misakyants - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, SEC "Ecology and Nature Management", Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: rak@bk.ru

\*Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания (Южный федеральный университет, проект № 0852-2020-0029) и государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант Президента РФ НШ-2511.2020.11) / The study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state order (Southern Federal University, project No. 0852-2020-0029) and state support of the leading scientific schools of the Russian Federation (grant of the President of the Russian Federation NSh-2511.2020.11).

Неведомая Елена Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, НОЦ «Экология и природопользование», Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: mj20@rambler.ru

Elena N. Nevedomaya - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, SEC "Ecology and Nature Management", Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: mj20@rambler.ru

Казеев Камил Шагидулович – доктор географических наук, профессор, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского, Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия, e-mail: kamil\_kazeev@mail.ru

Kamil Sh. Kazeev - Doctor of Geography, Professor, Department of Ecology and Environmental Management, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Stachki Ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: kamil\_kazeev@mail.ru

Представлены результаты исследований оценки экотоксичности висмута по активности каталазы для разных типов почв Юга России. Экотоксичность висмута в почве зависит от его химического соединения: нитрат висмута (86) > карбонат висмута (90) ≥ оксид висмута (93). Наибольшую экотоксичность на состояние почв оказывает нитрат висмута за счет хорошей растворимости и большей подвижности в почвенном растворе катионов  $Bi^{3+}$ . Оксид висмута оказал несколько меньшее негативное воздействие. Бурая лесная почва имеет меньшую устойчивость в связи с кислой реакцией почвенной среды, а серопески – в связи с легким гранулометрическим составом. Эти показатели почв способствуют высокой подвижности и, следовательно, экотоксичности висмута в почве.

**Ключевые слова:** висмут, активность каталазы, загрязнение, чернозём обыкновенный, бурая лесная почва, серопески, химические соединения висмута.

The results of studies of changes in the activity of catalase in ordinary chernozem, brown forest soil and sierosands under pollution with different of the bismuth chemical compounds: bismuth oxide, carbonate and nitrate are presented. It has been established that bismuth contamination of different types of soils reduces catalase activity, regardless of the chemical compounds. The toxicity of bismuth increases with an increase in the dose applied to the soil. Based on the chemical bismuth compounds, the average toxicity series for soils by catalase activity is as follows: bismuth nitrate (86) > bismuth carbonate (90) ≥ bismuth oxide (93). The greatest ecotoxicity is shown by bismuth nitrate due to its good solubility and greater mobility in the soil solution of  $Bi^{3+}$ . The bismuth oxide showed slightly less negative effects. The series of soil sensitivity to bismuth pollution has the following sequence: ordinary chernozem (95) > sierosands (89) ≥ brown forest soil (86). The most resistant to contamination with bismuth soil is ordinary chernozem, and the most sensitive soil is brown forest soil.

**Keywords:** bismuth, catalase activity, pollution, chernozem ordinary, brown forest soil, sierosands, bismuth chemical compounds.

## Введение

Соединения висмута в настоящее время всё чаще используются в различных сферах производства как альтернатива токсичному свинцу [1]. По данным Н.С. Касимова и Д.В. Власова [2], висмут обладает наивысшей степенью технофильности, уступая только углероду, азоту и хлору. В связи с широким использованием в различных сферах производства соединения висмута попадают в окружающую среду. Основными источниками загрязнения висмутом среды, в том числе почв, являются черная и цветная металлургия, автотранспорт, угольные ТЭС, горнодобывающая промышленность [3–12]. В результате концентрация висмута в почве может превышать фоновое содержание в 300 раз, достигая при этом 930–1891 мг/кг, а иногда и 5140 мг/кг [8, 13, 14]. Такое высокое содержание висмута может приводить к снижению видового разнообразия микробиоценоза, общей численности микроорганизмов, активности почвенных ферментов. В литературных

источниках данные о токсичности висмута противоречивы. Ряд авторов указывают на отсутствие токсических эффектов соединений висмута [15, 16], другие отмечают токсические эффекты при изучении соединений висмута у простейших и представителей почвенной фауны [17, 18]. Установлено токсическое действие висмута на биологические свойства почв: ферментативную активность, почвенные бактерии и грибы [19, 20]. Соединения висмута (III) с цистеином ингибируют активность уреазы с коэффициентом ингибирования  $1,84 \pm 0,15$  mM [21]. Однако данных в современной литературе о влиянии висмута на активность каталазы почв не обнаружено. Поскольку последняя отражает интенсивность процессов минерализации, протекающих в почве, и потенциальной биологической активности в ней, актуальным является изучение активности данного фермента при загрязнении висмутом.

Цель исследований – оценить экотоксичность висмута по активности каталазы в зависимости от химического соединения и буферности почв.

## Материалы и методы

Объектами изучения выбраны почвы, отличающиеся по своим генетическим свойствам: чернозём обыкновенный, бурая лесная и серопески. Характеристика генетических свойств почв (содержание гумуса и pH) и расположение мест отбора почв представлены в таблице.

Образцы почв отобраны из верхнего пахотного слоя (0–10 см), поскольку в нем задерживаются тяжелые металлы [22]. Фоновое содержание висмута в объектах исследования: в черноземе обыкновенном – 0,27, бурой лесной почве – 0,28, серопесках – 0,14 мг/кг. Содержание висмута в исследуемых почвах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург). При анализе литературных данных не обнаружено, какие химические соединения висмута попадают в почву. Вероятно, это могут быть оксиды, а также растворимые и нерастворимые соли. Эти химические соединения характерны для большинства тяжелых металлов, загрязняющих почву [22].

Определение биологических свойств почвы проводили через 10 сут после загрязнения. Более длительный срок инкубации увеличивает различия в состоянии почвы, инкубированной в лаборатории, от ее состояния в естественных условиях. Моделирова-

ние эксперимента по загрязнению почв проводили в трехкратной повторности в лабораторных условиях общепринятыми в биологии и экологии почв методами [23]. Почвы загрязняли оксидом висмута  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , карбонатом висмута  $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$ , нитратом висмута  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  в разных концентрациях – 1,5, 3, 15, 30, 150 и 300 мг/кг. Исследовали соединения висмута (III), поскольку его трехвалентное состояние является наиболее стабильным в природе [24]. При внесении оксида, карбоната и нитрата висмута в почву учитывалась растворимость соединений. Нитрат висмута растворяли в воде и вносили в почву при первом поливе. Оксид и карбонат растирали с небольшим количеством сухой почвы, а затем тщательно перемешивали с остальной почвой инкубационного сосуда, после чего поливали. Почву (0,5 кг) инкубировали при оптимальной влажности (60 % от полевой влагоемкости) и температуре 20–22 °C в трехкратной повторности. Ферменты класса оксидоредуктаз, к которым относят активность каталазы, при оценке устойчивости почв к химическому загрязнению являются наиболее чувствительными показателями [25–28]. Активность каталазы отражает интенсивность процессов минерализации в почве и является чувствительным показателем ее биологического состояния. Активность каталазы определяли через 10 сут после загрязнения чернозема обыкновенного, бурой лесной почвы и серопесков разными химическими соединениями висмута.

### Характеристика генетических свойств и мест отбора проб почв / Characteristics of soil genetic properties and soil sampling areas

Тип почв (гранулометрический состав)	Место отбора	Географические координаты	Тип угодья	Содержание гумуса, %	pH
Чернозем обыкновенный (тяжелосуглинистый)	г. Ростов-на-Дону, Ботанический сад ЮФУ	47°14'17.54" с.ш. 39°38'33.22" в.д.	Пашня	3,7	7,8
Бурая лесная кислая почва (тяжелосуглинистая)	Республика Адыгея, пос. Никель	44°10.649' с.ш. 40°9.469' в.д.	Грабово-бук- вый лес	1,8	5,8
Серопески, чернозем супесчаный (легкосуглинистый)	Ростовская область, Усть-Донецкий район	47°46.015' с.ш. 40°51.700' в.д.	Разнотравно- злаковая степь	2,3	6,8

Лабораторно-аналитические исследования выполнены с использованием общепринятых методов в биологии, почвоведении и экологии [23]. Активность каталазы определяли в 3 биологических и 4 аналитических повторностях газометрическим методом по методике [29]: по объему разложенной перекиси водорода за 1 мин и измеряли в мл  $\text{O}_2$  в 1 г почвы за 1 мин ( $n = 36$ ). Достоверность полученных результатов оценивали с помощью дисперсионного

анализа и последующего определения наименьшей существенной разности (НСР).

### Результаты и их обсуждение

Независимо от химического соединения висмута при внесении его в чернозём обыкновенный происходит ингибирование активности каталазы (рис. 1).

Оксид и карбонат висмута в дозе 300 мг/кг статистически достоверно снижают активность каталазы на 22 и 14 % соответственно от контрольных значений. При увеличении концентрации нитрата висмута наблюдали обратно пропорциональную зависимость. Доза 30–300 мг/кг вызывала снижение фермента на 10–16 % от контроля. Данный факт, возможно, обусловлен хорошей растворимостью нитрата висмута и большей подвижностью в почвенном растворе катионов  $\text{Bi}^{3+}$ . Несмотря на то что оксиды как нерастворимые соединения тяжелых металлов оказывают меньшее токсическое действие на почву, чем водорастворимые соли металлов, максимальная доза 300 мг/кг оксида висмута была наиболее токсичной для активности каталазы черноземов [30].

Ряд токсичности химических соединений висмута для чернозема обыкновенного по активности каталазы имеет вид: оксид висмута (97)  $\geq$  карбонат висмута (96)  $\geq$  нитрат висмута (93).

При внесении 30 мг/кг оксида и карбоната висмута в бурю лесную почву отмечено достоверное снижение активности каталазы на 10 % от контроля (рис. 2).

Внесение уже 3 мг/кг нитрата висмута ингибировало активность каталазы на 13 % от контроля. Дозы 150 и 300 мг/кг оксида, карбоната и нитрата висмута снижали активность каталазы на 23–41 % соответственно относительно контроля. Способность соединений висмута подавлять активность ферментов в бурой лесной почве, возможно, связана с наличием большого количества легкоразлагаемых органических веществ на её поверхности. Последние могут поддерживать относительно большие количества растворимых комплексов  $\text{Bi}$  с органическими веществами почвы [19].

Ряд токсичности химических соединений висмута для бурой лесной почвы по активности каталазы имеет вид: оксид висмута (89)  $\geq$  карбонат висмута (87)  $>$  нитрат висмута (81).

Малые дозы (1,5 мг/кг) всех изученных химических соединений висмута не оказывают влияния на активность каталазы в серопесках (рис. 3).

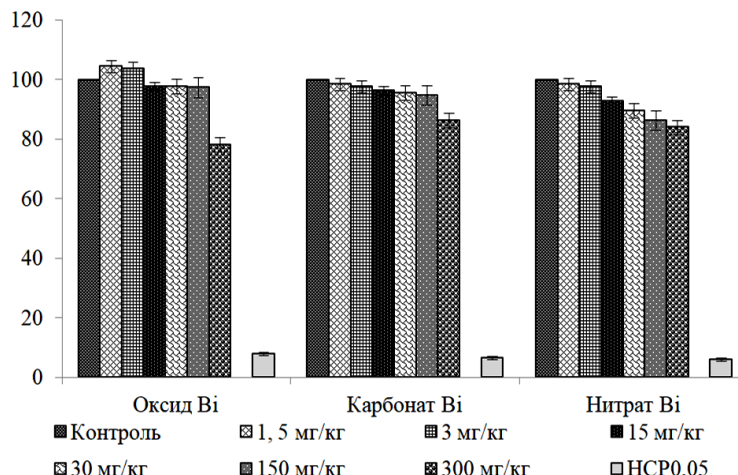


Рис. 1. Изменение активности каталазы при загрязнении висмутом чернозема, % от контроля / Fig. 1. Changes in catalase activity in case of bismuth contamination of chernozem, % of control

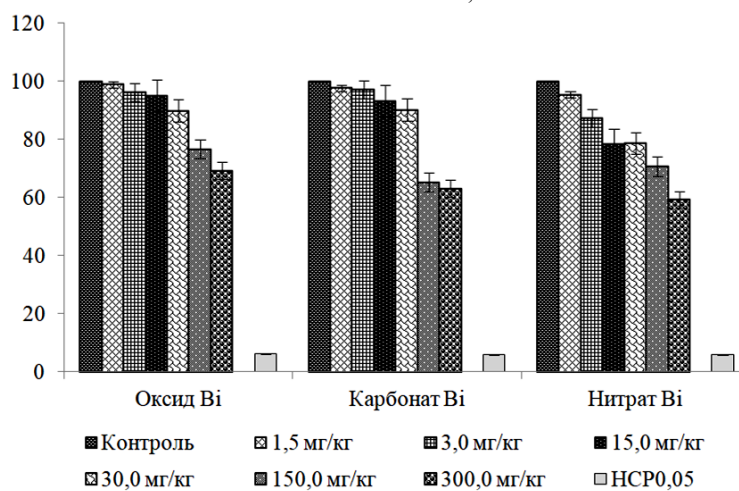


Рис. 2. Изменение активности каталазы при загрязнении висмутом бурой лесной кислой почвы, % от контроля / Fig. 2. Changes in catalase activity upon contamination of brown forest acidic soil with bismuth, % of control

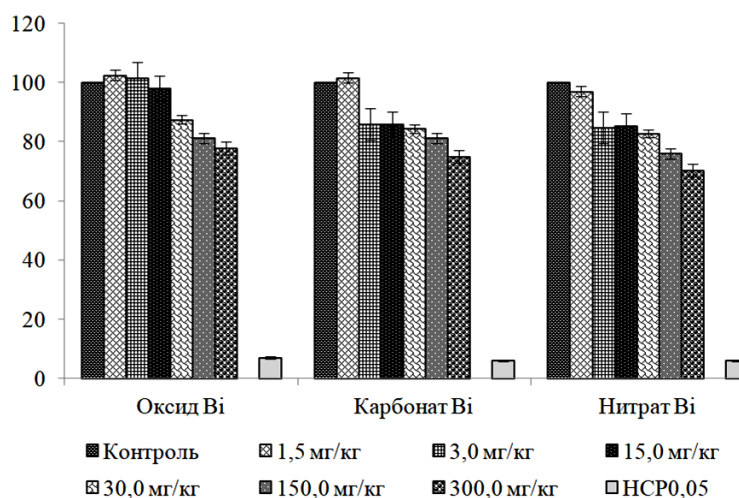


Рис. 3. Изменение активности каталазы при загрязнении висмутом серопесков, % от контроля / Fig. 3. Changes in catalase activity in sierosands contamination with bismuth, % of control

Оксид (30–300 мг/кг) ингибировал активность каталазы на 13–22 % относительно контроля. Дозы 3 и 15 мг/кг карбоната и нитрата висмута снижают активность каталазы на 14 и 15 % соответственно от контрольных значений, карбонат висмута (300 мг/кг) – на 25 %. Нитрат висмута (30–300 мг/кг) ингибировал активность каталазы серопесков на 17–30 % относительно контроля. Увеличение вносимой дозы, независимо от химического соединения висмута, вызывает снижение изучаемого показателя.

Таким образом, усредненный ряд токсичности химических соединений висмута для почв по активности каталазы имеет вид: нитрат висмута (86) > карбонат висмута (90) ≥ оксид висмута (93). Наибольшую экотоксичность оказывает нитрат висмута за счет хорошей растворимости и большей подвижности в почвенном растворе катионов  $\text{Bi}^{3+}$ . Нерастворимый в воде оксид висмута проявил несколько меньшее негативное воздействие. Установлено, что различные химические соединения висмута снижают биологические показатели почв, что приводит к ухудшению их свойств. При малых дозах загрязнения висмут, независимо от химического соединения, не оказывает существенного влияния на биологические показатели почв. Тем не менее экотоксичность висмута возрастает с увеличением дозы, вносимой в почву.

Ряд чувствительности почв к загрязнению висмутом имеет следующую последовательность: чернозём обыкновенный (95) > серопески (89) ≥ бурая лесная почва (86). Наиболее устойчивым к загрязнению висмутом является чернозём обыкновенный, а наиболее чувствительной почвой – бурая лесная. Вероятно, это обусловлено генетическими свойствами этих типов почв, которые обеспечивают устойчивость к загрязнению тяжелыми металлами. Для черноземов характерны видовое разнообразие почвенных микроорганизмов, высокие показатели ферментативной активности, нейтральная реакция почвенной среды, тяжелый гранулометрический состав. Бурые лесные почвы имеют кислую среду, обладают более низкими биологическими характеристиками по сравнению с черноземом обыкновенным. Бурые лесные почвы характерны для лесов предгорий Кавказа. Серопески широко представлены в степных регионах. Эти почвы более бедны по гумусовому содержанию. Они характеризуются малым количеством микроорганизмов и низкой активностью почвенных ферментов [31]. Легкий гранулометрический состав серопесков и кислая реакция среды бурых лесных почв

(рН = 5,8), а также низкое содержание органического вещества (2,3 и 1,8 % соответственно) способствуют высокой подвижности, следовательно, и высокой экотоксичности висмута в почвах.

### Заключение

Экотоксичность висмута зависит от его химического соединения: нитрат висмута (86) > карбонат висмута (90) ≥ оксид висмута (93). Наибольшую экотоксичность оказывает нитрат висмута за счет хорошей растворимости и большей подвижности в почвенном растворе катионов  $\text{Bi}^{3+}$ . Практически нерастворимые в воде химические соединения висмута проявили несколько меньшее негативное воздействие. Ряд чувствительности почв к загрязнению висмутом имеет следующую последовательность: чернозём обыкновенный (95) > серопески (89) ≥ бурая лесная почва (86). Бурая лесная почва менее устойчива в связи с кислой реакцией среды, а серопески – в связи с легким гранулометрическим составом. И то и другое способствует подвижности и, следовательно, экотоксичности висмута в почве.

### Литература

1. Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment // J. Reference EUR-lex. 2003. Vol. 37. P. 19–23.
2. Касимов Н.С., Власов Д.В. Технофильность химических элементов в начале XXI в. // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2012. № 1. С. 15–22.
3. Галямова Г.К. Химические элементы в почвах г. Усть-Каменогорска // Юг России: экология, развитие. География и геоэкология. 2013. № 2. С. 120–126.
4. Ларионова Н.А. Воздействие предприятий алюминевой промышленности на загрязнение окружающей среды // Экол. геология: теория, практика и региональные проблемы : материалы V Междунар. научн.-практ. конф. г. Воронеж (13–15 сентября 2017 г.). Воронеж: Научная книга, 2017. С. 78–80.
5. Крылов Д.А., Сидорова Г.П. Еще раз об экологическом воздействии на окружающую среду угольных ТЭС России // Энергия: экономика, техника, экология. 2015. № 12. С. 2–11.
6. Крылов Д.А. Негативное влияние элементов-примесей от угольных ТЭС на окружающую среду // Горн. информ.-аналит. бюл. 2017. № 12. С. 77–87.
7. Селиванова Н.В., Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Утилизация отходов гальванического производства // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2011. Т. 13, № 1. С. 2085–2088.

8. Юргенсон Г.А., Горбань Д.Н. Особенности распределения висмута в почвах, техноземах и растениях Шерловогорского рудного района // Междунар. журн. прикл. и фунд. исследований. 2017. № 7. С. 111–116.
9. Jung M.C., Thronton I., Chon H.-T. Arsenic, Sb and Bi contamination of soil, plants, waters, and sediments in the vicinity of the dalsung Cu-W mine in Korea // The Science of the Total Environment. 2002. No. 1–3. P. 81–89.
10. Xiong Q.L., Zhao W.J., Guo X.Y., Shu T.T., Chen F.T., Zheng X.X., Gong Z.N. Dustfall heavy metal pollution during winter in North China // Bull. Environ Contam Toxicol. 2015. No 4. P. 548–554.
11. Cortada U.M., Hidalgo C., Martinez J., Rey J. Impact in soil caused by metal (loid)s in lead metallurgy. The case of Cruz Smelter (Southern Spain) // Journal of Geochemical Exploration. 2018. Vol. 190. P. 302–313.
12. Wei C., Deng Q., Wu F., Fu Z., Xu L. Arsenic, antimony, and bismuth uptake and accumulation by plants in an old antimony mine, China // Biol. Trace Elem. Res. 2011. Vol. 144. P. 1150–1158.
13. Elekes C.C., Busuioac G. The mycoremediation of metals polluted soils using wild growing species of mushrooms // Latest Trends on Engineering Education. 2010. Vol. 1. P. 36–39.
14. Johnson C.A., Moench H., Wersin P., Kugler P., Wenger C. Solubility of antimony and other elements in samples taken from shooting ranges // J. Environ. Qual. 2005. Vol. 34. P. 248–254.
15. Gilster J., Bacon K., Marlink K., Sheppard B., Deveney C., Rutten M. Bismuth subsalicylate increases intracellular Ca<sup>2+</sup>, MAP-kinase activity, and cell proliferation in normal human gastric mucous epithelial cells // Dig Dis Sci. 2004. Vol. 49. P. 370–378.
16. Sano Yuri, Hiroshi Satoh, Momoko Chiba, Masahide Okamoto, Koji Serizawa, Hiroshi Nakashima, Kazuyuki Omae. Oral toxicity of bismuth in rat: single and 28-day repeated administration studies // J. Occup Health. 2005. Vol. 47, No. 4. P. 293–298.
17. Berthelot Y., Valton E., Auroy A., Trottier B., Robidoux P.Y. Integration of toxicological and chemical tools to assess the bioavailability of metals and energetic compounds in contaminated soils // Chemosphere. 2008. Vol. 74. P. 166–177.
18. Sousa M.C., Poiaras-de-Silva J. Cytotoxicity induced by bismuth subcitrate in *Giardia lamblia* trophozoites // Toxicology in Vitro. 1999. Vol. 13, iss. 4–5. P. 591–598.
19. Murata T. Effects of bismuth contamination on the growth and activity of soil microorganisms using thiols as model compounds // J. Environ. Sci. Health a Tox Hazard Subst. Environ. Eng. 2006. Vol. 41, No 2. P. 161–172.
20. Tsang K. W., Dugan P. R., Pfister R. M. Mobilization of Bi, Cd, Pb, Th, and U Ions from Contaminated Soil and the Influence of Bacteria on the Process Emerging Technologies in Hazardous Waste Management // IV ACS Symposium Series. 1994. P. 78–93.
21. Zhang L., Mulrooney S.B., Leung A.F.K., Zeng Y., Ko B.B.C., Hausinger R.P., Sun H. Inhibition of urease by bismuth (III): implications for the mechanism of action of bismuth drugs // Biometals. 2006. Vol. 19. P. 503–511.
22. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton: CrcPress, 2010. 548 p.
23. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.
24. Egorysheva A.V., Ellert O.G., Zubavichus Y.V., Gajtko O.M., Efimov N.N., Svetogorov R.D., Murzin V.Yu. New complex bismuth oxides in the Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NiO-Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> system and their properties // J. of Solid State Chemistry. 2015. Vol. 225. P. 97–104.
25. Kolesnikov S.I., Evreinova A.V., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Changes in the Ecological and Biological Properties of Ordinary Chernozems Polluted by Heavy Metals of the Second Hazard Class (Mo, Co, Cr, and Ni) // Eurasian Soil Science. 2009. Vol. 42, No. 8. P. 936–942.
26. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. Ranking of Chemical Elements According to Their Ecological Hazard for Soil // Russian Agricultural Sciences. 2010. Vol. 36, No. 1. P. 32–34.
27. Минникова Т.В., Сушкова С.Н., Манджиева С.С., Минкина Т.М., Колесников С.И. Оценка влияния бенз(а)пирена на биологическую активность чернозема Ростовской области // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 12. С. 91–102.
28. Цепина Н.И., Судьина Л.В., Минникова Т.В., Колесников С.И. Влияние загрязнения серебром на активность каталазы черноземов, бурых лесных почв и серопесков // Уч. зап. Крымского федерального ун-та им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2020. № 2. С. 259–266.
29. Галстян А.Ш. Унификация методов исследования активности ферментов почв // Почвоведение. 1978. № 2. С. 107–114.
30. Колесников С.И. Агроэкологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Краснодар, 2001. 35 с.
31. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов н/Д.: Эверест, 2008. 276 с.

## References

1. Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. (2003). *J. Reference EUR-lex*, No. 37, pp. 19–23.

2. Kasimov N.S., Vlasov D.V. (2012). Technophilicity of chemical elements at the beginning of the 21st century. *Vestn. Moskovskogo un-ta. Seriya 5: Geografiya*, No. 1, pp. 15-22. (in Russian).
3. Galyamova G.K. (2013). Chemical elements in soils of Ust-Kamenogorsk. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye. Geografiya i geoekologiya*, No. 2, pp. 120-126. (in Russian).
4. Larionova N.A. (2017). The impact of the enterprises of the aluminium industry on the environment pollution. *Ecological geology: theory, practice and regional problems*. International Scientific Practical Conference. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., pp. 78-80. (in Russian).
5. Krylov D.A., Sidorova G.P. (2015). Once again on the environmental impact of coal-fired power plants in Russia. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, No. 12, pp. 2-11. (in Russian).
6. Krylov D.A. (2017). Negative influence of impurity elements from coal-fired power plants on the environment. *Gorn. inform.-analit. byul.*, No. 12, pp. 77-87. (in Russian).
7. Selivanova N.V., Trifonova T.A., Syrkin L.A. (2011). Disposal of waste of galvanic production. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN*, vol. 13, No. 1, pp. 2085-2088. (in Russian).
8. Yurgenson G., Gorban D. (2017). Features of bismuth distribution in soils, technosols and plants of the Sherlovoaya mountain ore region. *Mezhdunar. zhurn. prikl. i fund. issledovaniy*, vol. 7, pp. 111-116. (in Russian).
9. Jung M.C., Thronton I, Chon H.-T. (2002). Arsenic, Sb and Bi contamination of soil, plants, waters, and sediments in the vicinity of the dalsung Cu-W mine in Korea. *The Science of the Total Environment*, No. 1-3, pp. 81-89. Doi 10.1016 / s0048-9697 (02) 00042-6.
10. Xiong Q.L., Zhao W.J., Guo X.Y., Shu T.T., Chen F.T., Zheng X.X., Gong Z.N. (2015). Dustfall heavy metal pollution during winter in North China. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 4, pp. 548-554.
11. Cortada U.M., Hidalgo C., Martinez J., Rey J. (2018). Impact in soil caused by metal (loid)s in lead metallurgy. The case of Cruz Smelter (Southern Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 190, pp. 302-313. Doi /10.1016/j.gexplo.2018.04.001.
12. Wei C., Deng Q., Wu F., Fu Z., Xu L. (2011). Arsenic, antimony, and bismuth uptake and accumulation by plants in an old antimony mine, China. *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 144 (1-3), pp. 1150-1158. Doi 10.1007/s12011-011-9017-x.
13. Elekes C.C., Busuioc G. (2010). The mycoremediation of metals polluted soils using wild growing species of mushrooms. *Latest Trends on Engineering Education*, vol. 1, pp. 36-39.
14. Johnson C.A., Moench H., Wersin P., Kugler P., Wenger C. (2005). Solubility of antimony and other elements in samples taken from shooting ranges. *J. Environ. Qual.*, vol. 34, pp. 248-254.
15. Gilster J., Bacon K., Marlink K., Sheppard B., Deveney C., Rutten M. (2004). Bismuth subsalicylate increases intracellular Ca<sup>2+</sup>, MAP-kinase activity, and cell proliferation in normal human gastric mucous epithelial cells. *Dig Dis Sci*, vol. 49, pp. 370-378.
16. Sano Yuri, Hiroshi Satoh, Momoko Chiba, Masahide Okamoto, Koji Serizawa, Hiroshi Nakashima, Kazuyuki Omae. (2005). Oral toxicity of bismuth in rat: single and 28-day repeated administration studies. *J. Occup. Health*, vol. 47, No. 4, pp. 293-298. Doi 10.1539/joh.47.293.
17. Berthelot Y., Valton E., Auroy A., Trottier B., Robidoux P.Y. (2008). Integration of toxicological and chemical tools to assess the bioavailability of metals and energetic compounds in contaminated soils. *Chemosphere*, vol. 74, pp. 166-177. Doi 10.1016/j.chemosphere.2008.07.056.
18. Sousa M.C., Poiarés-de-Silva J. (1999). Cytotoxicity induced by bismuth subcitrate in *Giardia lamblia* trophozoites. *Toxicology in Vitro*, vol. 13, iss. 4-5, pp. 591-598. Doi 10.1016/S0887-2333(99)00068-5.
19. Murata T. (2006). Effects of bismuth contamination on the growth and activity of soil microorganisms using thiols as model compounds. *J. Environ. Sci Health A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.*, vol. 41, No. 2, pp. 161-172. Doi 10.1080/10934520500349276.
20. Tsang K.W., Dugan P.R., Pfister R.M. (1994). Mobilization of Bi, Cd, Pb, Th, and U Ions from Contaminated Soil and the Influence of Bacteria on the Process. *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management IV*, March ACS Symposium Series, pp. 78-93. Doi 10.1021/bk-1994-0554.ch005.
21. Zhang L., Mulrooney S.B., Leung A.F.K., Zeng Y., Ko B.B.C., Hausinger R.P., Sun H. (2006). Inhibition of urease by bismuth (III): implications for the mechanism of action of bismuth drugs. *Biometals*, vol. 19, pp. 503-511.
22. Kabata-Pendias A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton, FL, CrcPress, 548 p.
23. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. (2016). *Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems*. Rostov-on-Don, SFU Press, 356 p. (in Russian).
24. Egorysheva A.V., Ellert O.G., Zubavichus Y.V., Gajtko O.M., Efimov N.N., Svetogorov R.D., Murzin V.Yu. (2015). New complex bismuth oxides in the Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NiO-Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> system and their properties. *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 225, pp. 97-104.
25. Kolesnikov S.I., Evreinova A.V., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. (2009). Changes in the Ecological and Biological Properties of Ordinary Chernozems Polluted by

Heavy Metals of the Second Hazard Class (Mo, Co, Cr, and Ni). *Eurasian Soil Science*, vol. 42, No. 8, pp. 936-942.

26. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. (2010). Ranking of Chemical Elements According to Their Ecological Hazard for Soil. *Russian Agricultural Sciences*, vol. 36, No. 1, pp. 32-34. (in Russian).

27. Minnikova T.V., Sushkova S.N., Mandzhieva S.S., Minkina T. M., Kolesnikov S. I. (2019). Evaluation of the influence of benz (a) pyrene on the biological activity of chernozem of the Rostov region. *Izv. Tomskogo politekhnich. un-ta. Inzhiniring georesursov*, vol. 330, No. 12, pp. 91-102. (in Russian).

28. Tsepina N.I., Sudina L.V., Minnikova T.V., Kolesnikov S.I. (2020). Influence of silver pollution on the activity of soil catalase in South of Russia. *Uchen. zap. Krymskogo federal'nogo un-ta im. V.I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*, No. 2, pp. 259-266. (in Russian).

29. Galstyan A.Sh. (1978). Unification of methods for studying the activity of soil enzymes. *Pochvovedenie*, No. 2, pp. 107-114. (in Russian).

30. Kolesnikov S.I. (2001). *Agroecological aspects of soil pollution by heavy metals*. Dissertation Thesis. Krasnodar, 35 p. (in Russian).

31. Val'kov V.F., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I. (2008). *Soils in South of Russia*. Rostov-on-Don, Everest Publ., 276 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию / Received*

*25 января 2021 г. / January 25, 2021*

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

### OUR PERSONS

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-134-136

#### **ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ БАБЕШКО** (к 80-летию со дня рождения)

#### **VLADIMIR ANDREEVICH BABESHKO** (on the Occasion of his 80th Birthday)



30 мая 2021 г. исполнилось 80 лет известному российскому ученому, действительному члену РАН Владимиру Андреевичу Бабешко. Он родился в 1941 г. накануне Великой Отечественной войны в ст. Новотитаровской Динского района Краснодарского края. После окончания средней школы и физико-математического факультета Ростовского государственного университета по специальности «механика» он поступил в аспирантуру на кафедру теории упругости. В 1966 г. под руководством проф. И.И. Воровича досрочно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Асимптотические методы решения контактных задач теории упругости для слоя».

Следующий этап в жизни В.А. Бабешко связан с преподавательской работой на родной кафедре теории упругости и с интенсивной научной деятельностью в новой области – теории динамических контактных задач теории упругости. В созданном при РГУ в 1971 г. НИИ механики и прикладной матема-

тики (НИИМ и ПМ) он становится заместителем директора по научной работе, продолжая интенсивную научную и преподавательскую деятельность. В 1973 г. молодой ученый получает звание лауреата премии Ленинского комсомола в области науки, а через год успешно защищает докторскую диссертацию на тему «Метод факторизации в статических и динамических задачах теории упругости». В ней были развиты методы решения новых классов смешанных динамических задач теории упругости, ставшие мощным инструментом исследования задач для полуограниченных тел.

До 1982 г. Владимир Андреевич работает в НИИМ и ПМ РГУ, отдавая все силы становлению института, много времени уделяет работе созданного отдела волновых процессов, воспитанию учеников. Он сочетает организаторскую и научную деятельность с педагогической, работая профессором кафедры теории упругости. Итогом научной и педагогической деятельности В.А. Бабешко за этот период стали две монографии, посвященные различным аспектам постановки и методам решения смешанных задач теории упругости, и воспитание целой плеяды учеников, которые в дальнейшем продолжили и развили его идеи.

В 1982 г. В.А. Бабешко был назначен ректором Кубанского государственного университета, которым он руководил 26 лет, активно участвуя в развитии науки и образования не только в Южном федеральном округе, но и в России. За это время Кубанский университет стал одним из самых динамично развивающихся вузов в южном регионе России, в чем огромна заслуга его ректора. Были созданы новые факультеты и кафедры, специальности и специализации, число обучающихся в университете увеличилось с 8 до 25 тыс. В Кубанском университете продолжилась интенсивная многогранная научная деятельность Владимира Андреевича. Были подготовлены и изданы еще 2 монографии, посвященные развитию метода факторизации применительно к анализу волновых процессов в упругих телах. Эти работы помогли вскрыть важные особенности формирования

волновых полей в однородных и неоднородных средах, сформировать новый инструментарий для исследования задач геофизики и геоэкологии.

С 1982 г. и по настоящее время Владимир Андреевич – заведующий кафедрой математического моделирования Кубанского университета. Характерным для его научного творчества является решение принципиальных вопросов в той или иной области знания. Во время руководства Кубанским университетом значительно расширились горизонты его научной и общественной деятельности. В этот период он активно влияет на процессы развития образования и науки в России, являясь вице-президентом Союза ректоров России, членом Высшей аттестационной комиссии. Активная жизненная позиция и авторитет ученого позволяют Владимиру Андреевичу оказывать влияние на выработку стратегических направлений развития образования и науки страны.

Плодотворная научная деятельность В.А. Бабешко по достоинству оценена научной общественностью страны: в 1987 г. он был избран чл.-кор. АН СССР, в 1997 г. – действительным членом РАН. В 2002 г. Владимир Андреевич стал лауреатом Государственной премии в области науки и техники. С 2000 по 2008 г. он избирался членом Президиума РАН, с 2004 г. является заместителем председателя Южного научного центра РАН.

Владимир Андреевич Бабешко – крупный ученый в области механики сплошной среды. Его научные результаты в области динамической теории упругости, теории волноводов и смешанных задач, геофизики известны не только в нашей стране, но и за рубежом. Основное направление его исследований составляет изучение динамических процессов в упругих телах, при этом для анализа колебаний он не только использовал значительную часть арсенала современной математической физики, но и создал новые подходы, позволяющие решать задачи, которые ранее не поддавались исследованию. Результаты этих работ применяются как в традиционных приложениях в геофизике, вибросейсморазведке, акустике, сейсмологии, дефектоскопии, фундаменто- и машиностроении, акустоэлектронике, так и в новых областях знания.

В.А. Бабешко – автор первоклассных результатов в теории смешанных задач теории упругости и электроупругости, акустике, математической физике, геофизике, сейсмологии. Эти научные результаты позволили ему и его многочисленным ученикам и ученицам не только исследовать конкретные краевые задачи динамической теории упругости и электроупругости, но и открыли пути к исследованию новых классов задач в этих и близких к ним областях механики, геофизики и акустики. Владимиру Андреевичу присущи не только великолепная научная интуиция, умение генерировать новые плодотворные идеи и научные направления, но и щедрость, с которой он делится своими идеями с учениками и последователями.

Основные научные результаты получены им в области смешанных задач теории упругости. Он предложил новые подходы к исследованию динамических смешанных задач для полуограниченных тел и интегральных уравнений с разностными ядрами, внес существенный вклад в основы классического метода Винера – Хопфа, в частности, метода факторизации функций и матриц-функций. Дальнейший анализ методов построения решений позволил В.А. Бабешко предложить ряд новых эффективных методов для решения смешанных динамических задач: обобщенной факторизации и фиктивного поглощения, которые с успехом использовались его учениками для решения и других классов задач. Метод фиктивного поглощения позволил свести исследование динамических контактных задач к решению интегральных уравнений, типичных для задач статики, и далее к конечным алгебраическим системам, что весьма упростило процедуру построения решения и позволило дать прозрачную физическую интерпретацию полученным решениям.

Следует отметить значительный вклад В.А. Бабешко в разработку новых подходов к исследованию динамических задач для слоистых структур с неровной границей и для тел конечных размеров. Им предложен способ построения граничных интегральных уравнений, опирающийся не на фундаментальные и сингулярные решения и теорию потенциала, а на анализ характеристического многочлена оператора теории упругости, который позволил формулировать новые граничные интегральные уравнения и системы 1-го рода с гладкими ядрами. Этот подход дал возможность далее построить интегральные уравнения в задачах для анизотропных сред, которые ранее не поддавались исследованию классическими средствами, и создать основы нового метода блочных элементов.

Владимиром Андреевичем с учениками была построена теория распространения упругих волн в слоисто-неоднородных волноводах с параллельно ориентированными неоднородностями (накладками, штампами, тонкими включениями, трещинами, электродами и т.д.), что позволило исследовать волновые поля и напряженно-деформированное состояние в их окрестности. Используя в сейсмологии эту теорию, можно гораздо точнее смоделировать структуру приповерхностного слоя Земли, учитывая кусочно-блочный его характер. Эта теория позволяет в значительной степени уточнить и оценить области применимости прикладных моделей геофизики, прикладных упрощенных теорий, используемых для моделирования многоэлектродных волноводных структур в акустоэлектронике.

Благодаря детальному анализу интегральных уравнений, описывающих волновые поля в слоистых средах, В.А. Бабешко сформулировал условия статичности, которые явились теоретической базой создания моделей направленного акустического излу-

чения, важного в различных прикладных областях. В своих работах он теоретически обосновал возможность зондирования заглубленных объектов с целью определения их расположения и объема, что весьма актуально не только в вибросейсморазведке и дефектоскопии, но и в целом для понимания особенностей постановки и решения многих коэффициентных и геометрических обратных задач по реконструкции свойств объектов, недоступных для непосредственного наблюдения.

Разработанная теория волновых процессов в неограниченных средах с неоднородностями позволила В.А. Бабешко совместно с академиками РАН И.И. Воровичем и И.Ф. Образцовым предсказать явление высокочастотного резонанса, которое было признано научным открытием («Явление высокочастотного резонанса в полугораниченных средах с неоднородностями», 1994).

Благодаря анализу структуры решений интегральных уравнений смешанных задач получены общие условия локализации волнового процесса для совокупностей различных типов неоднородностей. Это открытие стало фундаментом создания новых принципов вибрационного воздействия на глубоко расположенные участки Земли, зоны сейсмической активности для их разгрузки и снятия концентрации напряжений, снижения уровня сейсмоопасности. Пользуясь этими же принципами, можно осуществлять группирование виброисточников, создавая направленное акустическое воздействие в ограниченной области, что позволило сформулировать теоретические принципы создания некоторых устройств в геофизике и медицинской технике.

Творческий поиск и практические проблемы региона привлекли внимание В.А. Бабешко к проблемам экологии и геоэкологии, в том числе к проблеме прочности промышленных сооружений и хранилищ отходов вредных веществ, предотвращения загрязнений при техногенных авариях и катастрофах, постоянного экологического мониторинга воздушных и водных потоков. Исследования в новых направлениях опираются на аппарат, созданный ранее, что существенно раздвинуло сферу приложения методов, разработанных для моделей теории упругости.

За последние годы Владимир Андреевич Бабешко создал ряд новых научных направлений. Для многомерных систем дифференциальных уравнений в частных производных им разработан дифференциальный метод двойной факторизации, позволяющий исследовать широкий круг задач математической физики, механики деформируемого твердого тела,

физики, гидромеханики, геоэкологии и т.д. Предложенный математический аппарат опирается на методы теории групп и топологической алгебры. Дифференциальный метод факторизации, являясь обобщением метода интегральных преобразований, позволяет ответить на ряд вопросов о свойствах физических полей в каждом блоке уже на этапе решения краевой задачи.

Большое внимание В.А. Бабешко уделяет подготовке новых научных кадров. Его ученики (около 60 кандидатов и 17 докторов наук) достойно в разных областях – на педагогическом поприще, в структурах Академии наук – продолжают и развивают не только научные направления, созданные им, но и собственные, укрепляя традиции южнороссийской школы механиков в России и в мире.

Вся жизнь Владимира Андреевича – образец служения Родине и обществу, российской и мировой науке – отмечена высокими правительственными наградами. В их числе – ордена «Знак Почета» (1981), Дружбы народов (1986), Почета за заслуги в области образования, науки и большой вклад в подготовку квалифицированных специалистов (2006), им. А.С. Макаренко (2008). В.А. Бабешко – заслуженный деятель науки России, Кубани, Адыгеи. Награжден почетным знаком Международного гуманитарного фонда «Знание» им. С.И. Вавилова (2000), медалями «Герой труда Кубани» (2003), «40 лет полета Ю.А. Гагарина» (2001), АН ВШ России «За заслуги перед высшей школой» (2001), медалью «За просветительскую деятельность на благо России имени Екатерины II» (2006), ведомственными наградами.

Интенсивная научно-организационная деятельность В.А. Бабешко позволила включиться Кубанскому университету в ряд крупных международных проектов с участием университетов США, Германии, Греции, Турции и других стран, направленных как на интеграцию научной деятельности в области экологии и сейсмологии, так и на развитие общения людей и обмена опытом в области преподавания. Инновационные проекты и циклы работ, руководителем которых выступал Владимир Андреевич, удостоены золотых медалей на международных выставках в Париже и Брюсселе.

Его коллег и учеников, друзей и просто знакомых поражают в нем особая энергетика, обаяние и широта эрудиции, простота в общении, забота и внимание к людям, отзывчивость и тактичность. Есть два способа обучения учеников – наполнить сосуд и зажечь факел. Владимир Андреевич всегда был приверженцем второго способа.

*А.О. Ватульян, М.И. Карякин*

***Желаем Владимиру Андреевичу крепкого здоровья, удачи и внимания близких, новых научных результатов и долгих лет творчества на благо России!***

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

## SCIENTIFIC LIFE

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-137-138

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И БИОМЕХАНИКА В СОВРЕМЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

### MATHEMATICAL MODELING AND BIOMECHANICS AT A MODERN UNIVERSITY



В поселке Дивноморское Краснодарского края на базе спортлагеря «Радуга» с 26-го по 31 мая 2021 года в очном формате проходила XV Всероссийская школа-семинар, организаторами которой были Южный федеральный университет и Донской государственный технический университет.

Анализ заявок на участие в этом значимом научном мероприятии для молодых и опытных ис-

следователей показал, что с каждым годом интерес к проблемам биомеханики и моделирования растёт; об этом свидетельствуют и география участников научного мероприятия, и тематика представленных работ.

В работе приняли участие ученые Москвы, Санкт-Петербурга, Астрахани, Иваново, Перми, Ростова-на-Дону, Саратова, Владикавказа, Краснодар, Долгопрудного, Кургана, зарубежные исследователи из Армении, Беларуси, Вьетнама, Германии, Египта.

Цель научного мероприятия состояла в консолидации усилий учёных-механиков, практикующих врачей, биологов, физиологов, инженеров в области моделирования композитов, неоднородных структур, обратных задач, технических приложений в биомеха-



нике, в развитии экспериментальных исследований живых тканей, в обсуждении широкого спектра междисциплинарных вопросов, в интенсификации обмена информацией между специалистами различного профиля для решения актуальных проблем механики твердого тела, гидромеханики, биомеханики, в привлечении молодых ученых к научной деятельности в области моделирования.

Работа школы сочетала пленарные, очные и удаленные доклады, стендовые презентации. В силу сложившихся коронавирусных ограничений часть исследователей представляла свои результаты онлайн.

Отметим научные направления, которые привлекли внимание исследователей: вычислительная механика, математическое моделирование в ортопедии и травматологии, живых систем, сред сложной структуры, физических процессов и технических систем, а также междисциплинарные исследования и использование их ресурсов в учебном процессе, современные компьютерные технологии преподавания естественнонаучных дисциплин.

Достаточно представительными были направления, посвященные математическому моделированию живых систем и вычислительной биомеханике. Рассматривались различные проблемы численного моделирования тканей и органов, выявления закономерностей поведения сложных механических и биомеханических систем при различных условиях. Широкий спектр задач связан с проведением вычислительных экспериментов по моделированию различных процессов, протекающих в биологических тканях с учетом их сложной структуры, на основе использования современных КЭ-

технологий, решением ряда обратных задач по определению свойств материалов и тканей.

Направление, связанное с механикой композиционных материалов, посвящено разработке КЭ-моделей, позволяющих анализировать влияние фактора пористости, температурных режимов, электрических и магнитных полей на эффективные характеристики.

Биомеханика опорно-двигательной системы и соответствующие медицинские приложения исследуют различные аспекты моделирования костной ткани и имплантов, вопросы оптимизации хирургического воздействия при ортопедических операциях, экспериментальные исследования костной ткани в норме и при наличии патологии.

Раздел биомеханики тканей глаза посвящен различным вопросам моделирования заболеваний тканей глаза, исследованиям изменения свойств тканей при наличии различного типа патологий и в послеоперационный период, новым методам неинвазивной диагностики, в первую очередь моделированию тонометрии.

Многие доклады отражают результаты научных исследований, которые были выполнены в рамках проектов РФФИ и РФФИ. Значительное количество докладов было выполнено при поддержке мегапроекта – гранта Правительства РФ № 075-15-2019-1928.

30 мая участники школы присоединились к поздравлениям в адрес академика РАН В. А. Бабешко, которому в этот день исполнилось 80 лет. Выступили ученики Владимира Андреевича, была представлена презентация о его жизни и научной деятельности, о заслугах в области науки и образования РФ, о его научной школе.

*Ватульян А.О., Карякин М.И., Наседкин А.В., Соловьев А.Н.*

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-139-141

## ВЕСЕННИЙ ПРАЗДНИК ПРИРОДЫ И НАСЕЛЕНИЯ СТЕПЕЙ

### SPRING HOLIDAY OF NATURE AND POPULATION OF THE STEPPES

Весна – наиболее красивое, активное время года для природы и населения. В Ростовской области (далее РО) к ней приурочен фестиваль экологического туризма «Воспетая степь» – праздник экологов, любителей природы и населения. Праздник стал традиционным и ожидаемым многими людьми не только Донской земли, но и других регионов России. Ассоциация «Живая природа степи» (далее ассоциация) I фестиваль провела еще в 2013 г. на базе её Центра редких животных европейски степей (х. Кундрюченский) и полевого стационара (стационар) в п. Маныч Орловского р-на РО. В нем приняли участие заповедник «Ростовский», «Газпром», студенты вузов, учителя и ученики школ Ростова н/Д и п. Орловского, иные организации. Очередные II и III фестивали состоялись там же, но количество и география их участников увеличивались. Организаторами IV и следующих фестивалей стали минприроды РО, ассоциация, заповедник, администрации РО и Орловского р-на, департамент МЧС по РО. В охранной зоне заповедника строились временные палаточные городки с мастер-классами, презентационными площадками, сувенирными шалашами, сценой. Периодически над ними спускались прыгающие с самолетов парашютисты, висели баннеры с приветствиями, воздушные шары. Имелись парковочные зоны для автомашин, буфеты и медпункты. За порядком следили сотрудники заповедника, казаки и полиция. Участвовали организации из РО, Краснодарского и Ставропольского краев, Калмыкии, Волгоградской и Воронежской областей, Санкт-Петербурга, Москвы, других мест. Имелись площадки минприроды РО, Волгодонской АЭС, Азовского музея-заповедника, музея-заповедника М.А. Шолохова, ботсада ЮФУ, Ростовского художественного училища им. Грекова, Детского эколого-биологического центра Ростова н/Д, иных структур. В 2017 г., объявленном президентом Годом экологии и особо охраняемых природных территорий (ООПТ), фестиваль включили во всероссийские планы по проведению этого мероприятия.

В 2020 г., в связи с эпидемиологической обстановкой по коронавирусу, фестиваль отменили. Следующий, IX состоялся 24–25 апреля 2021 г. при солнечной погоде, на изумрудном ковре молодой степной травы, во время массового цветения тюльпанов, ирисов и других растений.

Организаторами его также были минприроды РО, заповедник, ассоциация и администрации РО и Орловского р-на. Серьезная обстановка с COVID-19 заставила ограничить количество участников, усилить медицинскую часть. В визит-центре заповедника и около входа на территорию фестиваля имелись конструкции с памятками о защите от коронавируса, поведении на природе, местах экскурсий. Всем участникам предоставили рукомойники, чистую воду, дезинфицирующие жидкости, репелленты, маски. За измерением температуры и состоянием здоровья участников следили медработники. Волонтеры обеспечивали постоянную чистоту территории.

Фестиваль привлек внимание многих организаций и лиц, занимающихся охраной природы, интересующихся вопросами экологии Дона, Калмыкии, Москвы и иных мест. Были представители туристических фирм и СМИ. В визит-центре они знакомились с деятельностью заповедника, его природой и историей. Недалеко от него находилась основная территория фестиваля. Здесь была сцена, где состоялось открытие фестиваля и выступали организаторы и почетные гости, участники концертной программы, вручались награды лучшим экологам. Рядом функционировали фотозоны «Заповедный Тихий Дон», в 4 больших шатрах с баннерами находились интерактивные площадки, демонстрирующие природоохранную деятельность разных структур. По соседству располагались многочисленные площадки с изделиями из природных материалов, сувенирами и наглядными экспонатами донских степей и экологической продукции, зоны питания и отдыха.

На экспозиции «Природа Дона. Познавательные факты» участники знакомились с виртуальными турами по природно-заповедному фонду РО, площадками «Тайный мир насекомых», «Рыбалка на Дону», «Экологические привычки», «Рептилии Дона», «Цветущий Дон», «Богатства недр», «Раздельный сбор отходов», «Места обитания птиц: птичий дом», «Пазлы: собери меня».

Свою природоохранную деятельность показали дирекция ООПТ РО и «Чистый город». Заповедник представил площадку «Степь – распахнутый настезь мир», террариум с пресмыкающимися, ушастого ежа и иных животных. На площадках ЮНЦ РАН, Ин-та степи УрО РАН, ассоциации, ЮФУ, ДТГУ участники знакомились с работами ученых и специалистов в области экологии и охраны

природы, подготовки специалистов. Орловский р-н представил экотуристам экологические проекты, реализуемые с участием центров «Точка роста», включая изучение характеристик воды и соляных бурь в районе. В одном из шатров находилась выставка картин донского художника О.Н. Майбороды, сопровождаемая классической музыкой камерного ансамбля Дворца культуры г. Сальска.

Для всех интересующихся, прежде всего учеников школ и колледжей, кадетов, студентов, проводи-

лись тематические лекции по значению и сохранению биологического разнообразия степей. Их вели вице-президент Русского географического общества, акад. РАН А.А. Чибилев, зам. министра Минприроды РО, зам. председателя по НИР ЮНЦ РАН, зав. лабораторией археологических исследований ЮНЦ РАН, президент ассоциации. Состоялись обмен мнениями, дискуссии специалистов и населения по вопросам экологии, природопользования. Лекторий всегда был заполнен слушателями.



Все экотуристы посетили участки естественной степи в районе озер Лопуховатое и Грузское, других мест. Вызвал восторг природный ковёр с массой красных, белых, желтых, пестрых, фиолетовых тюльпанов, ирисов и многих растений на фоне зеленой травы. Чистый с запахом трав воздух, яркое солнце, бескрайняя степь, соленые озера, различные бабочки, жуки, пресмыкающиеся и птицы, звенящие в воздухе голоса жаворонков образуют ве-

сенную картину степи. Знакомство, наблюдения, обсуждение, поиск белых и чёрных тюльпанов, крупных и интересных животных, их фотографирование, появление мустангов на о-ве Водный, сайгаков, лошадей Пржевальского, бизонов, верблюдов, других редких и ценных животных в ассоциации – всё это давало ощущение полноценного и длительного отдыха.



Популярность фестивалей с годами растет. Увеличивается количество людей, желающих быть его участниками. Если I фестиваль (2013 г.) посетили около 300 человек, то II (2014) – 500, III (2014) – 630, IV (2015) – 3,5 тыс., V (2016) – 7, VI (2017) – 8 (незарегистрированных 7 тыс.), VII (2018) – 10, VIII (2019) – 7, IX (2021) – 7 тыс. человек. Примерно столько же в дни фестиваля в охранной зоне заповедника официально незарегистрированных посетителей (как в 2017 г.). Начиная с 2018 г. в целях сохранения биоразнообразия степей количество зарегистрированных экотуристов ограничивается, но возрастает число неофициально отдыхающих. В 2021 г., несмотря на все ограничения, таких было около 6 тыс.

Фестиваль занимает ведущее место среди других мероприятий по экологическому образованию и воспитанию населения, координации природоохранной деятельности многочисленных экологических структур. Его влияние на позитивное формирование экологического мышления населения, прежде всего молодежи, с годами возрастает. Если на первых фестивалях посетители рвали цветы, ловили насекомых, рептилий, мусорили и наносили другой ущерб природе, то с каждым новым фестивалем количество таких нарушителей уменьшалось. На последних фестивалях они отсутствовали. Экотуристы участвуют в благоустройстве своих домовладений и улиц, в весенних и осенних посадках древесных насаждений, в борьбе с мусором. Они защищают от уничтожения высаженные в 50–80-е гг. «зеленые пояса» вокруг, зеленые насаждения в парках, на улицах, набережных Дона, памятники природы и т.д.

Люди начинают понимать, что их благосостояние и здоровье напрямую зависят от природы и её биоразнообразия. Птичий грипп, аллергия и многие другие новые болезни, включая пандемию коронавируса, связаны с неблагоприятным состоянием живой природы. Это доказано ведущими русскими и мировыми учеными. Я согласен с генсекретарём ООН Антониу Гутерришем, который 10–12.11.2020 на Парижском форуме мира сказал: «Когда мы сталкиваемся с такими глобальными вызовами, как, например, пандемия, помните, что около  $\frac{3}{4}$  новых инфекционных заболеваний связаны с последствиями деятельности человека. Эти новые болезни – результат нашего образа жизни. Разрушая экосистемы одну за другой, мы ослабляем биологические барьеры, сдерживающие эти вирусы, ослабляем наши собственные адаптивные способности. Утрата лесов, загрязнение океанов и исчезновение здоровых экосистем, которые являются наиболее эффективными природными средствами защиты, имеет очень глубокие последствия». Коронавирус поражает людей всех континентов и стран, безработных, олигархов и президентов. Борьба с ним и наносимый ущерб экономике, здоровью населения (триллионы долларов) оцениваются значительно большими финансовыми суммами, чем требуется на необходимую качественную охрану природы, её биоразнообразия, на разумное природопользование, улучшение благосостояния и здоровья населения. Это надо знать и понимать всем людям. В данном процессе определенную роль играют и донские фестивали.

*В.А. Миноранский*

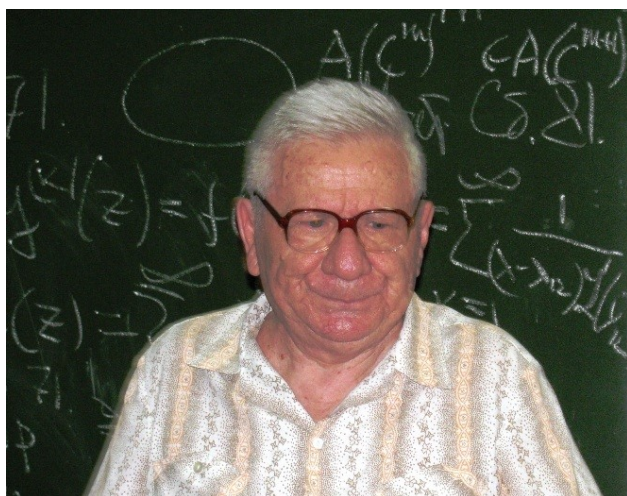
## ПАМЯТИ УЧЕНОГО

## IN MEMORY OF THE SCIENTIST

doi 10.18522/1026-2237-2021-2-142-144

## ПАМЯТИ ЮРИЯ ФЁДОРОВИЧА КОРОБЕЙНИКА

## IN MEMORY OF YURI FEDOROVICH KOROBENIK



3 мая 2021 г. ушёл из жизни Юрий Фёдорович Коробейник (1930–2021) – замечательный учёный, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заслуженный профессор Южного федерального университета. Человек, посвятивший родному механико-математическому факультету (ныне – Институту математики, механики и компьютерных наук ЮФУ) почти 70 лет своей долгой и достойной жизни.

Пережив эвакуацию, тяжелое время оккупации, голодные послевоенные годы, он сразу после окончания школы поступил на мехмат и уже на первом курсе поддался очарованию математического анализа. Свою первую научную работу по признакам сходимости числовых рядов он написал на втором курсе. В 1952 г. поступил в аспирантуру к Михаилу Григорьевичу Хапланову, при этом сам сформулировал тему будущей диссертации – «Исследование бесконечных систем линейных дифференциальных уравнений».

Защита состоялась осенью 1955 г. А в конце 50-х гг. определилось первое из двух магистральных направлений в научных изысканиях Ю.Ф. Коробейника – изучение разрешимости в комплексной обла-

сти линейных дифференциальных уравнений бесконечного порядка с многочленными коэффициентами и уравнений свертки, изучение свойств аналитических решений подобных уравнений. Если предыдущие исследования велись под влиянием идей Н.Н. Моисеева, И.И. Воровича, М.А. Красносельского, С.Г. Крейна и К.П. Персидского, то теперь важную роль сыграло знакомство с чл.-корр. АН СССР А.Ф. Леонтьевым. Вдохновившись идеями, разрабатываемыми в школе этого признанного специалиста по теории функций, дифференциальным уравнениям бесконечного порядка и дифференциально-разностным уравнениям, Юрий Фёдорович и сам успешно применил их в собственных работах, и сподвигнул к этому своих учеников.

В 1962–1964 гг. Ю.Ф. Коробейник перенес почти все результаты, полученные им для линейного дифференциального уравнения бесконечного порядка с многочленными коэффициентами, на уравнения в обобщенных производных. Многое из сделанного в эти годы было включено им в докторскую диссертацию «Аналитические решения операторных уравнений бесконечного порядка», успешно защищённую в 1965 г.

Начиная примерно с 1966 г. Ю.Ф. Коробейник занимался мало исследованными тогда решениями уравнений бесконечного порядка с постоянными коэффициентами, аналитическими в выпуклых некруговых областях, активно применяя при этом общую теорию двойственности в локально выпуклых пространствах и некоторые факты теории целых функций экспоненциального типа. При этом внимание учёного привлекали и другие задачи, например свойства линейных операторов, удовлетворяющих определенным коммутационным соотношениям. Вскоре главным направлением становится изучение систем элементов, по которым можно разложить в ряд любой элемент из рассматриваемого пространства, но при этом не обязательно единственным образом. Такие системы занимают промежуточное положение между хорошо ис-

следованными базисами и полными системами и обладают по сравнению с ними многими новыми свойствами, важными для приложений. В результате Юрий Фёдорович закладывает основы нового направления – теории представляющих и абсолютно представляющих систем в локально выпуклых пространствах. В нескольких работах середины 70-х гг. он описывает двойственную связь между свойством системы быть представляющей или абсолютно представляющей в отделимом локально выпуклом пространстве и разрешимостью в сопряженном пространстве соответствующей интерполяционной задачи или совпадением в нем определенных топологий. Впоследствии эти основополагающие результаты Ю.Ф. Коробейник успешно применил при исследовании систем экспонент и их обобщений, имеющих значительный удельный вес в комплексном анализе, которые ранее интенсивно изучались с позиций теории функций А.Ф. Леонтьевым и его научной школой. В нескольких статьях (в том числе в ключевой, опубликованной в 1981 г. в «Успехах математических наук») он изучил связь между наличием в отделимом локально выпуклом пространстве сходящегося (или абсолютно сходящегося) нетривиального разложения нуля по системе обобщенных экспонент и свойством этой системы быть представляющей или абсолютно представляющей. Новая теория, которую активно развивали ученики Юрия Фёдоровича, в частности А.В. Абанин и С.Н. Мелихов, нашла широкое применение в комплексном анализе и аналитической теории линейных уравнений в частных производных с постоянными коэффициентами, а также привела к развитию не менее важных смежных направлений, среди которых наибольший интерес представляют новые классы интерполяционных задач и топологические свойства индуктивных и проективных пределов различных функциональных пространств. В первые два десятилетия развития теории представляющих систем полученные общие результаты применялись, как правило, лишь к различным пространствам аналитических функций. Однако впоследствии Ю.Ф. Коробейник с успехом применил их к пространствам бесконечно дифференцируемых функций и решил с их помощью ряд трудных задач, связанных с продолжением таких функций по Борелю – Уитни и справедливостью для них аналога теоремы Пэли – Винера – Шварца. Всего Юрием Федоровичем опубликовано свыше 350 научных работ и 10 монографий. Итоги своей научной работы подвел сам Юрий Федорович, опубликовав в последние годы 4 тома избранных трудов.

Юрия Фёдоровича Коробейника в полной мере можно считать создателем собственной, хорошо из-

вестной научному сообществу, математической школы. Он дал путёвку в жизнь 24 своим ученикам, из которых 22 защитили кандидатские диссертации, 5 стали докторами наук. Его первый дипломник, К.С. Мамий, прошел путь от ассистента до профессора и заведующего кафедрой математического анализа в Адыгейском государственном университете. Другие ученики успешно работают в Москве (Г.Г. Браичев – профессор в МПГУ, В.Б. Шерстников – профессор в НИЯУ МИФИ), в различных ростовских вузах (РГУПС – В.А. Богачёв, ДГТУ и его филиал в Шахтах – И.М. Мальцев, А.Б. Михайлов, И.С. Шрайфель, В.А. Савельев), в Германии (А.В. Дедушев), в Сингапуре (Ле Хай Хой – профессор в Nanyang Technological University) и Вьетнаме (Ха Зуй Банг – профессор в Institute of Mathematics, Vietnam Academy of Science and Technology).

И, конечно, нельзя не упомянуть тех, кто продолжал и продолжает дело своего наставника на родном факультете, – среди них С.В. Фоменко, О.В. Епифанов, В.В. Моржаков, Т.И. Коршикова, Ю.А. Кирютенко, А.В. Абанин, С.Н. Мелихов, Д.А. Полякова. Благодаря активно действующему научному семинару они проводили и проводят исследования, прямо или косвенно связанные с тематикой, определенной Ю.Ф. Коробейником. Кроме того, именно они поддерживали и поддерживают традицию совмещения активной научной работы с педагогической деятельностью, осуществляемой на весьма высоком уровне.

В течение 45 лет (1960–2005) Юрий Фёдорович разработал и прочитал большое количество разнообразных по тематике и уникальных по содержанию специальных курсов, непосредственно связанных с его научными исследованиями: целые функции; теорема Стоуна – Вейерштрасса, её обобщения и приложения; асимптотические методы в анализе; дифференциальные уравнения бесконечного порядка; базисы, полные и представляющие системы; достаточные множества и их приложения.

Ю.Ф. Коробейник на протяжении всей своей жизни активно выступал на научных семинарах, участвовал в работе различных школ и конференций, перечислить которые просто не представляется возможным. Получив в своё время поддержку таких известных математиков, как А.Ф. Леонтьев (на II Всесоюзной конференции по комплексному анализу), С. Мандельброт и Б.Я. Левин (на Всемирном конгрессе математиков в Москве в 1966 г.), Юрий Фёдорович передавал эстафету учёным следующим поколениям, поддерживая их советами, рекомендациями, профессиональной (максимально корректной!) критикой, активно рекомендуя достойные работы к публикации. А лекции, которые приглашённый профессор Коробейник читал в

университетах Уфы, Саратова, Нижнего Новгорода, Львова, Черновцов, Великого Новгорода, Душанбе, Нальчика, Якутска, запомнились многим слушателям.

Активная жизненная позиция не позволяла Юрию Фёдоровичу оставаться в стороне и от организационной работы – учёный регулярно принимал участие в проведении конференций самого высокого уровня на Северном Кавказе (Теберда, Владикавказ, Новороссийск, Волгодонск, Ростов-на-Дону). Авторитет учёного нередко помогал ему успешно решать возникающие проблемы, профессионализм гарантировал отбор материалов высокого уровня, а доброжелательность и глубокие всесторонние знания обеспечивали весьма благоприятную атмосферу сотрудничества. С момента основания в 1972 г. журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» (до 1992 г. – «Известия СКНЦ ВШ. Естественные науки») Юрий Фёдорович – член редакционного совета журнала. Его высокая требовательность к научному уровню публикаций способствовала становлению журнала как авторитетного издания, представленного сегодня в RSCI на платформе Web of Science.

Мехмат менял названия (физико-математический факультет, механико-математический факультет, Институт математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича), но одно оставалось неизменным – присутствие среди сотрудников Юрия Фёдоровича Коробейника. Главным делом его жизни была кафедра математического анализа. Её коллектив (Ю.Ф. Коробейник руководил им на протяжении 24 лет), её научная работа, преподавание любимого предмета... Когда-то он написал:

*Лес формул, мрачный и густой...*

*Но, коль за дело дружно взялись,*

*Вас очарует красотой*

*Математический анализ.*

*И мы горды за свой предмет,*

*Работе трудной знаем цену:*

*Несем анализа мы свет*

*Всем тем, кто нам идет на смену!*

Благодаря Юрию Фёдоровичу на кафедре сформировалась крепкая команда учеников и единомышленников.

Несколько лет он являлся проректором Ростовского государственного университета по науке, а его деятельность на посту президента Ростовского математического общества в немалой степени способствовала развитию математики в Ростове-на-Дону и области. Весом вклад учёного и в подготовку кадров высшей квалификации на Северном Кав-

казе: Ю.Ф. Коробейник на протяжении ряда лет был председателем докторского диссертационного совета по математике – единственного совета по математике в южном регионе. Его принципиальность в оценке представляемых к защите результатов и огромный авторитет сыграли большую роль в повышении уровня диссертационных работ.

В 2007–2011 гг. благодаря совместным усилиям Ю.Ф. Коробейника и профессора А.Г. Кусраева, возглавлявшего во Владикавказе научно-исследовательский институт, который сегодня называется Южным математическим институтом – филиалом ВШЭ РАН, в ЮФУ был фактически создан филиал ЮМИ, ныне состоящий из отделов математического анализа и дифференциальных уравнений, в первом из которых Юрий Фёдорович продолжал свою научную деятельность в последние годы.

Заслуги Ю.Ф. Коробейника были по достоинству оценены государством и университетом. В 1991 г. указом президента России ему присвоено звание заслуженного деятеля науки Российской Федерации, в 2005 г. он был награжден орденом Дружбы, в 1996 г. решением ученого совета РГУ ему присвоено звание заслуженного профессора университета.

И всё-таки самое главное – безупречная репутация профессионала высокого уровня, блестящего учёного, человека, бесконечно преданного делу, которой в полной мере обладал Юрий Фёдорович. Коллеги помнят и ставят в пример молодым сотрудникам, приходящим на факультет, его неравнодушие, искренность, потрясающую работоспособность, готовность поддержать в трудную минуту. Его безграничную благодарность своим учителям, которым он посвятил такие строки:

*Их нет в живых... И мы стареем,*

*Учеников своих растим.*

*О днях прошедших не жалеем,*

*Но иногда слегка грустим*

*Да вспоминаем юность нашу*

*(И на душе уже теплей...).*

*Я поднимаю эту чашу*

*За дорогих Учителей!*

Юрий Фёдорович Коробейник навсегда останется в памяти всех его учеников и знавших его коллег и как крупный учёный, великолепный преподаватель, организатор науки и образования самого высокого класса, посвятивший свою жизнь любимой науке – математике и ее развитию в России, и как замечательный человек, искренне делившийся своими многочисленными талантами со всеми, кто окружал его в этом благородном деле.

*А.В. Абанин, А.О. Ватульян, Я.М. Ерусалимский, М.И. Карякин, Ю.А. Кирютенко, С.Б. Климентов, А.Г. Кусраев, И.М. Мальцев, С.Н. Мелихов, Ю.С. Налбандян, Ю.А. Устинов*

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.  
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки [http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7362](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362). Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», ИВИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office Word 2000, 2003, 2007, 2010, 2016 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman, размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сопроводительное или рекомендательное письмо, если статья представляется от организации. Экспертное заключение.
4. Полное название организации и ее адрес на русском и английском языках.
5. Сведения об авторах с указанием адреса, по которому будет вестись переписка, на русском и английском языках.
6. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
7. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
8. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через Объединённый каталог «Пресса России». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие). В неподписной период отдельные номера журнала за нынешний и прошлые годы можно приобрести в редакции.

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru)

Адрес в Интернете: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://www.izvestiya.sfedu.ru)