

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2025

3

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, академик РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. 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
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНИЦ 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
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Г.Г. Бабаян – доктор техн. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
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
М.Ю. Жуков – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Н. Карапетянц – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Д.В. Карелин – доктор биол. наук, Институт географии РАН, Россия
М.И. Карякин – доктор физ.-мат. наук, доцент, 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
С.Н. Мелихов – 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
С.Г. Парада – доктор геол.-мин. наук, доцент, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, 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
М.А. Сазыкина – доктор биол. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
В.И. Силаев – доктор геол.-мин. наук, Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Россия
В.Н. Труфанов – доктор геол.-мин. 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

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

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, Academician, 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
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chairman of the Editorial Board, Candidate of Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, 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
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
A.V. Abanin - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
G.G. Babayan - Doctor of Technical Sciences, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Armenia
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
M.Y. Zhukov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal 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
A.N. Karapetyants - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
Dmitry V. Karelin - Doctor of Biology, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences
M.I. Karjakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate 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
S.N. Melikhov - 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
S.G. Parada - Doctor of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 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
M.A. Sazykina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
Valerii I. Silaev - Doctor of Geology and Mineralogy, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia
V.N. Trufanov - Doctor of Geology and Mineralogy, 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

The Founders

Dagestan State Technical University,
Dagestan State University,
Don State Technical University,
Berebekov 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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi: 10.18522/1026-2237-2025-3

*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
№ 3 (227) 2025 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. 3 (227) 2025*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

К 110-ЛЕТИЮ ЮФУ

TO THE 110th ANNIVERSARY OF SFEDU

Ватulyян А.О., Ворович Л.С., Карякин М.И. О развитии механики деформируемого твердого тела в Ростовском университете 4

Vatulyan A.O., Vorovich L.S., Karyakin M.I. On the Development of Solid Mechanics at Rostov University 4

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Авсянкин О.Г., Тихонова Г.А. Ограниченность интегральных операторов с однородными ядрами в L_p -пространствах с радиальным весом 9
Бештоков М.Х. Компактно-разностная схема для уравнения колебания струны 17
Данилова Н.В., Колесникова Е.А. Вычисление цен опционов в моделях с неопределённой волатильностью при помощи формул Беллмана 25
Сумбатян М.А., Максимова О.Г., Петрова Т.О. Метод граничного интегрального уравнения в коротковолновом рассеянии волн на поверхности с периодической нерегулярностью 34
Чебаков М.И., Колосова Е.М. Контактная задача для пороупругого цилиндра конечных размеров на винклеровском основании 44

Avsyankin O.G., Tikhonova G.A. Boundedness of Integral Operators with Homogeneous Kernels in Weighted L_p -spaces with Radial Weights 9
Beshtokov M.Kh. Compact-Difference Scheme for the Equation of String Oscillation 17
Danilova N.V., Kolesnikova E.A. Calculation of Option Prices in Models with Uncertain Volatility Using Bellman Formulas 25
Sumbatyan M.A., Maksimova O.G., Petrova T.O. Boundary Integral Equation Method in Short-Wave Diffraction by Surfaces with Periodic Irregularity 34
Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact Problem for a Poroelastic Cylinder of Finite Dimensions on a Winkler Foundation 44

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Аджиева А.А., Кереева З.М.</i> Исследование взаимосвязи грозовой активности конвективных облаков с процессами градообразования.....	55
<i>Глинка В.В., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А.</i> Скорость смещения берегов и объемы утраченных земель в пределах Волгоградского водохранилища по материалам обследований с использованием БПЛА и историческим спутниковым данным	66
<i>Дахова О.О., Куповых Г.В., Кереева З.М., Каурова Л.Л.</i> Современное состояние подземных питьевых и технических вод Кабардино-Балкарии ...	75
<i>Ергина Е.И., Алексашкин И.В., Дубас В.В., Литвин В.А., Хижняк Ю.С.</i> Эколого-геохимическая характеристика содержания тяжелых металлов в почвах под лесными экосистемами Карадагского природного заповедника	84
<i>Федоров Ю.А., Косолапов А.Е., Гарькуша Д.Н., Дмитрик Л.Ю., Усова Е.В.</i> Сульфиды и метан в донных отложениях и затопленных почвах Цимлянского водохранилища	101
<i>Хаванский А.Д., Эртель А.Б., Богачев И.В., Меринова Ю.Ю.</i> Конструктивная география и устойчивое развитие региона	113
<i>Шадринова О.В., Легостаева Я.Б.</i> Техногенный педогалогенез на территории Алакит-Мархинского кимберлитового поля (Якутия, Россия).....	122

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Бисултанова З.И., Джамбетова П.М.</i> Анализ эффективности SSR-маркеров для генотипирования некоторых видов лекарственной флоры.....	135
<i>Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А.</i> Некоторые морфологические и биохимические особенности винных штаммов дрожжей <i>S. cerevisiae</i> в условиях стресса	143

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

<i>Миноранский В.А., Тимофеенко Ю.В., Гриценко М.В.</i> Красота и богатство донских степей	150
--	-----

ШТРИХИ К ПОРТРЕТУ

<i>Ерусалимский Я.М.</i> Игорь Борисович Симоненко (к 90-летию со дня рождения)	155
---	-----

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

<i>Рябов Г.В., Закруткин В.Е.</i> Анатолий Иванович Гавришин (к 85-летию)	160
<i>Карякин М.И., Ватульян А.О.</i> Михаил Иванович Чебаков (к 80-летию).....	162
<i>Любовь Семеновна Ворович</i>	164

SCIENCES OF EARTH

<i>Adzhiev A.Kh., Kupovykh G.V., Adzhieva A.A., Kerefova Z.M.</i> Study of the Relationship Between Thunderstorm Activity of Convective Clouds and the Processes of Hail Formation.....	55
<i>Glinka V.V., Saprygin V.V., Ivlieva O.V., Bespalova L.A.</i> Shoreline Displacement Rates and Volumes of Lost Lands within the Volgograd Reservoir Based on UAV Surveys and Historical Satellite Data	66
<i>Dakhova O.O., Kupovykh G.V., Kerefova Z.M., Kairova L.L.</i> Current Condition of Underground Drinking and Service Waters of Kabardino-Balkaria	75
<i>Ergina E.I., Aleksashkin I.V., Dubas V.V., Litvin V.A., Khizhnyak Yu.S.</i> Ecological and Geochemical Characteristics of the Content of Heavy Metals in Soils under Forest Ecosystems of the Karadag Natural Reserve	84
<i>Fedorov Yu.A., Kosolapov A.E., Gar'kusha D.N., Dmitrik L.Yu., Usova E.V.</i> Sulfides and Methane in Bottom Sediments and Flooded Soils of the Tsimlyansk Reservoir	101
<i>Khavanskii A.D., Ertel A.B., Bogachev I.V., Merinova Yu.Yu.</i> Constructive Geography and Sustainable Development of the Region	113
<i>Shadrinova O.V., Legostaeva Ya.B.</i> Technogenic Pedohalogenesis in the Territory of the Alakit-Markha Kimberlite Field (Yakutia, Russia)	122

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Bisultanova Z.I., Dzhambetova P.M.</i> Analysis of the Efficiency of SSR Markers for Genotyping of Some Types of Medicinal Flora	135
<i>Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Abakarova A.A.</i> Some Morphological and Biochemical Features of Wine Strains Yeast <i>S. cerevisiae</i> under Stress	143

SCIENTIFIC LIFE

<i>Minoransky V.A., Timofeenko Yu.V., Gritsenko M.V.</i> The Beauty and Riches of the Don Steppes.....	150
--	-----

TOUCHES TO THE PORTRAIT

<i>Erusalimsky Ya.M.</i> Igor Borisovich Simonenko (to the 90th Anniversary).....	155
---	-----

OUR PERSONS

<i>Ryabov G.V., Zakrutkin V.E.</i> Anatoly Ivanovich Gavrishin (to the 85th Anniversary).....	160
<i>Karyakin M.I., Vatulyan A.O.</i> Mikhail Ivanovich Chebakov (to the 80th Anniversary)	162
<i>Lyubov Semenovna Vorovich</i>	164

К 110-ЛЕТИЮ ЮФУ

TO THE 110th ANNIVERSARY OF SFEDU

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-4-8>

О РАЗВИТИИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА В РОСТОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

ON THE DEVELOPMENT OF SOLID MECHANICS AT ROSTOV UNIVERSITY

Развитие науки в области механики на физмате РГУ интенсифицировалось с момента создания на факультете в 1934 г. кафедры теоретической механики, которой временно заведовал астроном А.А. Батырев. В те далекие времена тематика научных исследований в первую очередь была связана с именем известного отечественного ученого Дмитрия Никаноровича Горячева (1867–1949), ученика Н.Е. Жуковского. Область его интересов была весьма широкой, работы относились к общей механике, аэрогидромеханике, проблеме движения абсолютно твердого тела с неподвижной точкой (случай Горячева).

В 1938 г. заведующим кафедрой теоретической механики стал Александр Петрович Коробов (1885–1952), приглашенный в Ростов-на-Дону выпускник Киевского политехнического института, ученик всемирно известного механика С.П. Тимошенко. Александр Петрович занимался проблемами прочности и устойчивости элементов конструкций. В 1939 г. ему без защиты была присуждена степень доктора технических наук. В дальнейшем он стал заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, известным в стране ученым в области теории устойчивости колонн и балок, прочности кривых брусьев, конструирования уникальных машин для испытания материалов.

В трудные годы Великой Отечественной войны эвакуация университета в город Ош Киргизской ССР, утраты кадрового состава в военное и послевоенное время привели к ослаблению научной деятельности.

В 1946 г. был восстановлен в расширенном виде Научно-исследовательский физико-математический институт, директором которого назначили А.П. Коробова. Это дало импульс развитию на факультете научной и образовательной деятельности в области механики и математики.

Новый период в развитии механики в Ростовском университете начался в конце 40-х гг. XX в., когда появились новые сотрудники: в 1949 г. – выпускник мехмата МГУ, кандидат наук Леонид Александрович Толоконников, в 1950 г. – еще два выпускника мехмата МГУ, кандидаты наук Никита Николаевич Моисеев и Иосиф Израилевич Ворович.

Никита Николаевич Моисеев успел до войны окончить МГУ. Во время войны служил в Красной армии. В 1948 г. защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук и завершил службу в армии в должности начальника учебного отдела Харьковского высшего военного авиационного училища в звании капитана. В начале 1950-х гг. после переезда в Ростов-на-Дону поступил в докторантуру Математического института им. Стеклова, вёл исследовательскую работу по динамике твёрдого тела с полостями, заполненными жидкостью, в 1955 г. защитил докторскую диссертацию. С 1956 г. он работал в Московском физико-техническом институте: сначала в качестве профессора кафедры математики, позднее – деканом аэромеханиче-

ского факультета, последние 20 лет – в Вычислительном центре АН. Впоследствии Никита Николаевич создал несколько научных направлений в области механики и прикладной математики. Он – лауреат Государственной премии СССР за цикл работ по динамике движения тел (1980), академик АН СССР (1984).

Иосиф Израилевич Ворович окончил 4 курса мехмата МГУ в 1941 г., а во время Великой Отечественной войны – Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского. Далее – служба в рядах армии, возвращение в академию и защита кандидатской диссертации по техническим наукам под руководством будущего академика В.С. Пугачева. В 1950 г. после демобилизации вместе с Н.Н. Моисеевым направлен в РГУ на кафедру теоретической механики. Это время характеризуется его активной научной и преподавательской деятельностью, работой над докторской диссертацией, посвященной различным аспектам нелинейной теории оболочек, и ее защитой в 1958 г.

Иосиф Израилевич Ворович координировал и направлял рост молодых исследователей, благодаря чему была создана научная школа по механике, неоднократно получавшая поддержку президента РФ в виде научных грантов.

Отметим основные достижения Иосифа Израилевича: Государственная премия СССР (1983) за создание математической модели экосистемы Азовского моря, Государственная премия Российской Федерации (1998) года в области науки и техники за цикл работ по фундаментальным проблемам тонкостенных конструкций, академик АН СССР (1990).

Многие годы на кафедре работал еженедельный научный семинар по механике твердого деформируемого тела, организованный в 1951 г. Н.Н. Моисеевым и И.И. Воровичем и имевший значение для всей страны. В первое время докладчиками были студенты, разбиравшие опубликованные в центральной печати статьи, связанные с тематикой их курсовых и дипломных работ. Участниками семинара были также математики и физики. Через него прошли поколения математиков и механиков не только Ростова-на-Дону, но и многих республик и учебных заведений СССР, потом СНГ. Молодые ученые докладывали свои научные результаты, не всегда удачные. Руководители семинара помогали найти неточности, расширить область исследований, не посягая на достоинство докладчика, никогда не унижая его. Эти семинары посещали ученые с разных концов нашей страны.

В 1961 г. кафедра теоретической механики была разделена на две – образованы кафедры теории упругости и гидромеханики. С момента создания кафедры теории упругости до своего ухода из жизни в 2001 г. ее возглавлял И.И. Ворович, кафедрой гидромеханики на начальном этапе заведовал А.К. Никитин. Сотрудниками кафедры теории упругости в те годы были В.М. Александров, Л.Б. Царюк, Ю.В. Сафронов, Ю.А. Устинов.

Интенсивное развитие наукоемких областей промышленности в стране в послевоенные годы способствовало формированию научных направлений в области механики. Потребность в высококвалифицированных кадрах для народного хозяйства и образования на юге страны привела к необходимости создания структурного подразделения, выпускники которого получали бы углубленное образование в области механики деформируемого твердого тела. Как показало дальнейшее развитие науки на факультете, кафедра теории упругости стала основным центром подготовки специалистов высшей квалификации в регионе. Проводились исследования, актуальные с точки зрения развития науки и ее приложений в народном хозяйстве. В основу их формирования И.И. Ворович положил актуальность тематики, фундаментальность изучаемой проблемы и прикладную направленность результатов. В 60-е гг. XX в. были сформированы следующие научные направления: математические проблемы нелинейной теории тонкостенных конструкций, смешанные, в том числе контактные, задачи теории упругости, проблема перехода от трехмерных к двумерным краевым задачам теории упругости, теории толстых плит, динамические задачи теории упругости, несколько позже – математические модели термовязкоупругости и механики связанных полей, стохастическая механика, теории устойчивости. Параллельно с фундаментальными направлениями развивались прикладные исследования в области машиностроения, приборостроения, динамической прочности конструкций, зубчатых передач и механики материалов, в том числе полимеров. За десять лет на кафедре теории упругости под руководством И.И. Воровича был создан мощный исследовательский и педагогический коллектив молодых ученых (В.М. Александров, В.А. Бабешко, А.В. Белоконь, В.Г. Громов, И.Г. Кадомцев, О.К. Аксентян,

В.В. Копасенко, В.М. Ненастьева (Шутько), Б.И. Сметанин, приехавший из Ленинграда Л.М. Зубов – ученик А.И. Лурье, переведенный с кафедры гидромеханики Э.Н. Потетюнко, инженеры Г.А. Журавлев, Б.Н. Кузин, Б.Г. Пьянков, В.П. Зацаринный, К.В. Исаев, И.П. Пронченко, Ю.П. Степаненко и др.).

В 1971 г. на базе коллектива кафедры был создан Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики (НИИМиПМ), ставший флагманом фундаментальных и прикладных исследований в области механики и математической экологии на Юге России.



Состав кафедры 1970-х гг.

В это время активно развиваются новые научные направления в механике деформируемого твердого тела, среди которых задачи электроупругости, динамические смешанные задачи теории упругости, задачи для неоднородных структур. К этому же периоду относятся защиты докторских диссертаций и появление первых докторов наук, у которых И.И. Ворович был научным консультантом: Ю.П. Красовский («Выделение особенности у функции Грина общих краевых задач для эллиптических уравнений», 1969), В.М. Александров («Асимптотические методы в смешанных задачах теории упругости», 1971), В.И. Юдович («Математические вопросы теории устойчивости течений жидкости», 1973), В.А. Бабешко («Метод факторизации в статических и динамических задачах теории упругости», 1974), Ю.А. Устинов («Проблема предельного перехода от трехмерных задач теории упругости и краевые задачи для поперечно-неоднородных плит», 1977). Несколько позже докторские диссертации защитили сотрудники кафедры Л.М. Зубов («Полуобратные и вариационные методы в нелинейной теории упругости», 1985) и А.В. Белоконь («Колебания и волны в полуограниченных и ограниченных телах», 1988).

В конце 70-х – начале 80-х гг. XX в. на кафедре появились молодые преподаватели А.О. Ватульян, И.П. Гетман, несколько позже – А.С. Скалиух, А.В. Наседкин, М.И. Карякин, активно включившиеся в учебный процесс и научные исследования.

В сложные для страны 1990-е гг., несмотря на множественные проблемы в образовании и финансировании науки, расширилась проблематика научных направлений кафедры, процесс подготовки новых кадров высшей квалификации продолжался. Защитили докторские диссертации

сотрудники кафедры: И.П. Гетман («Колебания и распространение волн в неоднородных упругих и пьезоактивных волноводах», 1991), И.Г. Кадомцев («Упруго-пластическое соударение тел», 1992), А.О. Ватульян («Метод граничных интегральных уравнений в динамических задачах анизотропной теории упругости и электроупругости», 1993), Э.Н. Потетюнко («Волновые движения жидкости со свободными границами», 1994), Л.П. Лебедев («Некоторые математические проблемы теории упругих и вязкоупругих конструкций», 1998), Д.Н. Карпинский («Принципы дальнего действия и локализации в механике разрушения», 1999).

Весомый вклад в формирование научного потенциала механиков Ростова-на-Дону внесли сотрудники НИИМиПМ РГУ, принимавшие активное участие в выполнении госбюджетных научных тем и хозяйственных работ. Интенсивно развивается тематика, связанная с динамическими задачами теории упругости и теории оболочек, контактной прочности, создаются новые системы идентификации полимерных материалов и неразрушающего контроля. Эти направления нашли приложение в фундаментостроении при проектировании фундаментных плит конструкций ответственного назначения, сейсморазведке – при создании теоретических основ разведки полезных ископаемых, в повышении прочности и оптимизации геометрии оболочек сложной структуры, в машиностроении. Отметим исследователей, интенсивно и успешно работавших над развитием этих направлений и защитивших докторские диссертации: М.Г. Селезнев («Асимптотические методы в динамических задачах теории упругости для многосвязных полуграниченных областей», 1988), Е.В. Глушков («Динамика неоднородных упругих сред», 1988), А.С. Юдин («Развитие математических моделей и методов расчета вибраций и звукоизлучения конструктивно-сложных оболочек», 1991), А.Я. Ционский («Колебания составных оболочечных конструкций в жидкости», 1993), М.А. Сумбатьян («Исследование высокочастотных волновых процессов с приложением к задачам ультразвукового неразрушающего контроля», 1995), О.Д. Пряхина («Динамика массивных тел, взаимодействующих с многослойными полуграниченными средами со сложными физико-механическими свойствами», 1997), А.А. Ляпин («Динамика слоистых сред с произвольно расположенными неоднородностями», 1999), В.В. Калинчук («Динамические контактные задачи для предварительно напряженных сред», 2000), М.И. Чебаков («Аналитические и численно-аналитические методы решения контактных задач теории упругости», 2002), С.М. Айзикович («Контактные задачи для неоднородных сред», 2003).

В укреплении кадрового состава механиков принимали участие многие кафедры факультета. На кафедре математического моделирования защитили диссертации А.В. Наседкин («Волновые поля в анизотропных упругих средах с усложненными свойствами и методы конечно-элементного динамического анализа», 2001), В.А. Еремеев («Механика двухфазных тел с микроструктурой при конечных деформациях», 2004), А.Н. Соловьев («Прямые и обратные задачи для конечных упругих и электроупругих тел», 2005); на кафедре дифференциальных и интегральных уравнений – Н.В. Боев («Асимптотические методы в прямых и обратных задачах высокочастотной динамики упругих сред», 2005); на кафедре гидромеханики – Б.И. Сметанин («Аналитические методы в задачах теории упругости со смешанными граничными условиями и их приложения в механике разрушения», 2007); на кафедре теории упругости – М.И. Карякин («Равновесие и устойчивость нелинейно-упругих тел при учете изолированных дефектов и микроструктуры материала», 2014). Эти диссертационные работы внесли существенный вклад в развитие моделей для тел с микроструктурой, исследование их прочности, асимптотические методы исследования волновых полей с приложениями к задачам неразрушающего контроля элементов конструкций, развитие и совершенствование методов вычислительной механики.

В 2001 г. И.И. Ворович ушел из жизни. Ныне его имя носит Институт математики, механики и компьютерных наук ЮФУ. Кафедру теории упругости возглавил профессор А.О. Ватульян. Традиции сохранялись и приумножались, но наряду с устоявшейся научной тематикой сформировались новые научные направления: обратные задачи механики (коэффициентные, геометрические), вычислительная механика, нелинейная механика, механика сред со сложными свойствами (дислокации, дисклинации), моделирование тканей в биомеханике. Отметим также научные направления кафедры математического моделирования – механика пьезоматериалов и композитов, вычислительная механика, создание КЭ-пакета ACELAN.

При жизни И.И. Ворович задумал написание энциклопедической монографии «Лекции по механике Ньютона. Современный взгляд». Большая часть этого труда была создана самим автором,

но осталась незавершенной. В 2005 г. при непосредственном участии учеников и сотрудников кафедры опубликована первая часть монографии, а в 2010 г. – вторая.

Среди настоящего состава сотрудников института – 5 членов Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике: Л.М. Зубов, А.В. Наседкин, А.О. Ватульян, М.А. Сумбатян, М.И. Карякин.

Исследования молодых кандидатов наук, выпускников кафедры неоднократно поддерживались грантами и стипендиями президента РФ, грантами РФФИ и РНФ, медалями и премиями Российской академии наук. В 2011 г. награды РАН удостоилась студентка 5-го курса Таисия Сигаева за работу «Оптимизация формы нелинейно-упругих тонкостенных конструкций», в 2017 г. – студент 2-го курса магистратуры Виктор Юров за работу «Распространение волн в неоднородных волноводах».

Огромен вклад преподавателей-механиков в подготовку бакалавров и магистров института. За время существования кафедры подготовлено более тысячи выпускников в области механики и прикладной математики: они работают преподавателями теоретической механики и сопротивления материалов, математики и прикладной механики, информатики, научными сотрудниками, системными администраторами, программистами, руководителями коммерческих структур.

Большим авторитетом в России и за ее пределами пользуется созданная И.И. Воровичем научно-педагогическая школа ученых-механиков, среди которых более 55 докторов наук и свыше 200 кандидатов наук. В ее среде сформировались как ученые и педагоги ректор Кубанского государственного университета академик РАН В.А. Бабешко, ректор РГУ и президент Южного федерального университета А.В. Белоконь, член-корреспондент РАН В.В. Калинин, заслуженные деятели науки РФ В.М. Александров, Ю.А. Устинов, В.И. Юдович, А.О. Ватульян, профессор Л.М. Зубов, создавшие свои научные школы.

Отметим также среди выпускников лауреатов Государственной премии РФ Е.В. Глушкова, О.Д. Пряжину. За рубежом нашей страны работают доктора наук И.П. Гетман, Л.П. Лебедев, В.А. Еремеев.

Активно ведется научно-исследовательская работа и подготовка кадров. За последние 10 лет на кафедре теории упругости выполнено 14 грантов РФФИ и 3 гранта РНФ, издано 9 монографий. Совместными усилиями кафедр факультета выполнена работа по реализации мегапроекта, создано несколько направлений в лаборатории вычислительной механики.

Кафедра теории упругости участвует в научной жизни региона и страны, совместно с кафедрами факультета (института) с 1995 г. организуются и проводятся конференции по механике сплошной среды, с 2005 г. – школа-семинар «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете». За последние 15 лет укрепились связи с Южным математическим институтом (г. Владикавказ), в котором успешно работает ряд сотрудников кафедры.

Коллектив кафедры, среди членов которой большое количество молодых кандидатов и докторов наук, активно участвует в совершенствовании работы Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, с оптимизмом смотрит в будущее, по-прежнему отдавая много сил и времени как научной деятельности, так и подготовке новых поколений исследователей и педагогов.

А.О. Ватульян, Л.С. Ворович, М.И. Карякин

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 517.9

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-9-16>

ОГРАНИЧЕННОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ С ОДНОРОДНЫМИ ЯДРАМИ В L_p -ПРОСТРАНСТВАХ С РАДИАЛЬНЫМ ВЕСОМ

Олег Геннадиевич Авсянкин^{1✉}, Галина Александровна Тихонова²

^{1, 2} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ ogavsyankin@sfedu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9091-417X>

² kamenskih@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1138-5116>

Аннотация. В весовом пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$ рассматриваются многомерные интегральные операторы, ядра которых однородны степени $(-n)$. При этом предполагается, что весовая функция w – радиальная. Получены достаточные условия ограниченности интегральных операторов с однородными ядрами. В формулировке достаточных условий существенно используется функция растяжения весовой функции w . Этот результат – обобщение теоремы С.М. Умархаджиева, которая была установлена при дополнительном предположении инвариантности ядра относительно всех вращений пространства \mathbb{R}^n . Выделена весовая функция, являющаяся полумультипликативной. Отдельно рассмотрен случай интегральных операторов с однородными ядрами, действующих в пространстве $L_\infty(\mathbb{R}^n, w)$. Получены условия на ядро, необходимые для ограниченности интегральных операторов с однородными ядрами в пространствах $L_p(\mathbb{R}^n, w)$. В качестве следствия установлены необходимые условия ограниченности в случае ядер, инвариантных относительно всех вращений пространства \mathbb{R}^n . Для операторов с такими ядрами необходимые условия ограниченности принимают значительно более простой вид. Показано, что достаточные условия ограниченности, вообще говоря, не совпадают с необходимыми. Все полученные результаты сравниваются с известными (классическими).

Ключевые слова: интегральный оператор, однородное ядро, группа вращений, ограниченность, функция растяжения, полумультипликативность

Для цитирования: Авсянкин О.Г., Тихонова Г.А. Ограниченность интегральных операторов с однородными ядрами в L_p -пространствах с радиальным весом // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 9–16. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-9-16>

Благодарности: работа выполнена при поддержке Регионального научно-образовательного математического центра ЮФУ, соглашение Минобрнауки России № 075-02-2025-1720.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

BOUNDEDNESS OF INTEGRAL OPERATORS WITH HOMOGENEOUS KERNELS IN WEIGHTED L_p -SPACES WITH RADIAL WEIGHTS

Oleg G. Avsyankin^{1✉}, Galina A. Tikhonova²

^{1, 2} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ ogavsyankin@sfedu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9091-417X>

² kamenskih@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1138-5116>

© Авсянкин О.Г., Тихонова Г.А., 2025

Abstract. In the weighted space $L_p(\mathbb{R}^n, w)$, we consider multidimensional integral operators with kernels homogeneous of degree $(-n)$, where the weight function w is assumed to be radial. We obtain sufficient conditions for the boundedness of integral operators with homogeneous kernels in these spaces. In the formulation of these conditions, we make essential use of the dilation function associated with the weight w . These results generalize a theorem by S. M. Umarchadzhiev, which was previously proved under the additional assumption that the kernel is invariant under all rotations of \mathbb{R}^n . We single out the case where the weight function is semi-multiplicative. In addition, we consider separately the case of integral operators with homogeneous kernels acting in the space $L_\infty(\mathbb{R}^n, w)$. Furthermore, we derive necessary conditions on the kernel for the boundedness of integral operators in $L_p(\mathbb{R}^n, w)$. As a consequence, we establish necessary conditions for boundedness in the case of kernels invariant under all rotations of \mathbb{R}^n , for which the conditions take a significantly simpler form. It is shown that, in general, the sufficient conditions for boundedness do not coincide with the necessary ones. All obtained results are compared with known (classical) results.

Keywords: integral operator, homogeneous kernel, rotation group, boundedness, dilation function, semi-multiplicativity

For citation: Avsyankin O.G., Tikhonova G.A. Boundedness of Integral Operators with Homogeneous Kernels in Weighted L_p -spaces with Radial Weights. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):9-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-9-16>

Acknowledgments: the work was carried out with the support of the Regional Scientific and Educational Mathematical Center of SFedU, Agreement of the Ministry of Education and Science of Russia No. 075-02-2025-1720.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

В настоящее время имеется немало работ, посвященных теории многомерных интегральных операторов с однородными ядрами. Для таких операторов, рассматриваемых в L_p -пространствах, получены условия ограниченности, установлены критерии нетеровости и обратимости, описаны порождаемые этими операторами банаховы алгебры, найдены необходимые и достаточные условия применимости проекционных методов [1–6]. Значительно меньше эти операторы изучены в случае весовых L_p -пространств. В работах [2, 7, 8] исследована ограниченность операторов с однородными ядрами в L_p -пространствах со степенным весом. Многомерным интегральным операторам с однородными степени $(-n)$ ядрами в пространствах с полумультипликативным и непрерывным радиальным весом посвящены статьи [9, 10].

В данной работе многомерные интегральные операторы с однородными степени $(-n)$ ядрами рассматриваются в L_p -пространствах с произвольным радиальным весом. Для них получены достаточные условия ограниченности, обобщающие результаты из [11]. Кроме того, найдены условия, необходимые для ограниченности интегрального оператора в указанных пространствах. Показано, что в общем случае необходимые условия не совпадают с достаточными. Полученные в статье результаты сопоставляются с известными.

Ниже использованы следующие обозначения: \mathbb{R}^n – n -мерное евклидово пространство; $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$; $|x| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$; $x' = x/|x|$; $e_1 = (1, 0, \dots, 0)$; $S_{n-1} = \{x \in \mathbb{R}^n : |x| = 1\}$; $|S_{n-1}| = 2\pi^{n/2}/\Gamma(n/2)$ – площадь сферы S_{n-1} ; $\mathbb{R}_+ = (0, \infty)$.

Достаточные условия ограниченности

Пусть $1 \leq p \leq \infty$ и функция $w: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ измерима. Обозначим через $L_p(\mathbb{R}^n, w)$ пространство (классов) измеримых комплекснозначных функций с нормой

$$\|f\|_{L_p(\mathbb{R}^n, w)} = \|f\|_{p, w} = \left(\int_{\mathbb{R}^n} |f(x)|^p w(|x|) dx \right)^{1/p}, \quad 1 \leq p < \infty,$$

$$\|f\|_{L_\infty, w(\mathbb{R}^n)} = \|f\|_{\infty, w} = \operatorname{ess\,sup}_{x \in \mathbb{R}^n} |f(x)|w(|x|).$$

В случае $w(x) \equiv 1$ $L_p(\mathbb{R}^n, w)$ совпадает с обычным пространством $L_p(\mathbb{R}^n)$.

Ниже существенную роль будет играть функция $w_*(t) = \sup_{s>0} \frac{w(ts)}{w(s)}$, которая называется *рас-тяжением* функции $w(t)$ [12, с. 75].

В пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$, $1 \leq p \leq \infty$, рассмотрим оператор

$$(K\varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} k(x, y)\varphi(y)dy, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

где функция $k(x, y)$ измерима и однородна степени $(-n)$:

$$k(\alpha x, \alpha y) = \alpha^{-n} k(x, y), \quad \forall \alpha > 0. \quad (2)$$

В работе [11] получены достаточные условия ограниченности оператора K в пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$ при дополнительном предположении инвариантности ядра относительно всех вращений пространства \mathbb{R}^n . Для удобства читателя сформулируем это утверждение.

Предложение 1 [11]. Пусть функция $k(x, y)$ однородна степени $(-n)$ и инвариантна относительно группы вращений $SO(n)$ пространства \mathbb{R}^n , т.е.

$$k(\omega(x), \omega(y)) = k(x, y), \quad \forall \omega \in SO(n). \quad (3)$$

Тогда если

$$\kappa = \int_{\mathbb{R}^n} |k(e_1, y)| |y|^{-n/p} (w_*(1/|y|))^{1/p} dy = \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, e_1)| |x|^{-n/p'} (w_*(|x|))^{1/p} dx < \infty, \quad (4)$$

то оператор K ограничен в пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$, причем $\|K\varphi\|_{p,w} \leq \kappa \|\varphi\|_{p,w}$.

Найдем достаточные условия ограниченности оператора K в случае ядра, не удовлетворяющего условию (3).

Теорема 1. Пусть $1 \leq p < \infty$ и пусть ядро $k(x, y)$ оператора K удовлетворяет условию (2), а также условиям:

$$\kappa_1 = \text{ess sup}_{\sigma \in \mathbb{S}^{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(\sigma, y)| |y|^{-n/p} (w_*(1/|y|))^{1/p} dy < \infty, \quad (5)$$

$$\kappa_2 = \text{ess sup}_{\sigma \in \mathbb{S}^{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, \sigma)| |x|^{-n/p'} (w_*(|x|))^{1/p} dx < \infty. \quad (6)$$

Тогда оператор K ограничен в пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$, причем

$$\|K\varphi\|_{p,w} \leq \kappa_1^{1/p'} \kappa_2^{1/p} \|\varphi\|_{p,w}.$$

Доказательство. Непосредственно имеем

$$\begin{aligned} |(K\varphi)(x)| &\leq \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, y)| |\varphi(y)| dy = \int_{\mathbb{R}^n} \left\{ |k(x, y)|^{1/p'} |y|^{-n/pp'} \left(\frac{w(|x|)}{w(|y|)} \right)^{1/pp'} \right\} \times \\ &\times \left\{ |k(x, y)|^{1/p} |y|^{n/pp'} \left(\frac{w(|y|)}{w(|x|)} \right)^{1/pp'} |\varphi(y)| \right\} dy. \end{aligned}$$

Применяя неравенство Гёльдера, получим

$$|(K\varphi)(x)| \leq (\mathcal{J}(x))^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |k(x, y)| |y|^{n/p'} \left(\frac{w(|y|)}{w(|x|)} \right)^{1/p'} |\varphi(y)|^p dy \right)^{1/p},$$

где

$$\mathcal{J}(x) = \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, y)| |y|^{-n/p} \left(\frac{w(|x|)}{w(|y|)} \right)^{1/p} dy.$$

После замены $y = |x|t$, с учетом однородности функции $k(x, y)$, представим $\mathcal{J}(x)$ в виде

$$\mathcal{J}(x) = |x|^{-n/p} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x', t)| |t|^{-n/p} \left(\frac{w(|x|)}{w(|x||t|)} \right)^{1/p} dt.$$

Заметим, что

$$w_*(1/|t|) = \sup_{x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \left(\frac{w(|x|/|t|)}{w(|x|)} \right) = \sup_{x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \left(\frac{w(|x|)}{w(|x||t|)} \right).$$

Тогда

$$\mathcal{J}(x) \leq |x|^{-n/p} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x', t)| |t|^{-n/p} (w_*(1/|t|))^{1/p} dt \leq \kappa_1 |x|^{-n/p}.$$

$$\text{Таким образом, } |(K\varphi)(x)| \leq \kappa_1^{1/p'} |x|^{-n/pp'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |k(x, y)| |y|^{n/p'} \left(\frac{w(|y|)}{w(|x|)} \right)^{1/p'} |\varphi(y)|^p dy \right)^{1/p}.$$

$$\|K\varphi\|_{p,w} = \left(\int_{\mathbb{R}^n} |(K\varphi)(x)|^p w(|x|) dx \right)^{1/p} \leq$$

$$\leq \kappa_1^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |x|^{-n/p'} w(|x|) dx \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, y)| |y|^{n/p'} \left(\frac{w(|y|)}{w(|x|)} \right)^{1/p'} |\varphi(y)|^p dy \right)^{1/p}.$$

Изменим порядок интегрирования:

$$\|K\varphi\|_{p,w} \leq \kappa_1^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(y)|^p w(|y|) |y|^{n/p'} dy \int_{\mathbb{R}^n} |k(x,y)| |x|^{-n/p'} \left(\frac{w(|x|)}{w(|y|)} \right)^{1/p} dx \right)^{1/p}.$$

Во внутреннем интеграле сделаем замену переменных $x = |y|t$. Используя условие (2), получим

$$\begin{aligned} \|K\varphi\|_{p,w} &\leq \kappa_1^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(y)|^p w(|y|) dy \int_{\mathbb{R}^n} |k(t,y')| |t|^{-n/p'} \left(\frac{w(|y||t|)}{w(|y|)} \right)^{1/p} dt \right)^{1/p} \leq \\ &\leq \kappa_1^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(y)|^p w(|y|) dy \int_{\mathbb{R}^n} |k(t,y')| |t|^{-n/p'} (w_*(|t|))^{1/p} dt \right)^{1/p} \leq \\ &\leq \kappa_1^{1/p'} \left(\operatorname{ess\,sup}_{y' \in \mathbb{S}_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(t,y')| |t|^{-n/p'} (w_*(|t|))^{1/p} dt \right)^{1/p} \|\varphi\|_{p,w} = \kappa_1^{1/p'} \kappa_2^{1/p} \|\varphi\|_{p,w}. \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Замечание 1. В случае $p = 1$ достаточно только одного условия (6). Тогда $\|K\varphi\|_{1,w} \leq \kappa_2 \|\varphi\|_{1,w}$.

Замечание 2. Для функции $k(x,y)$, инвариантной относительно группы вращений $SO(n)$, теорема 1 совпадает с предложением 1. В самом деле, пусть кроме условий теоремы 1 функция $k(x,y)$ удовлетворяет условию (3). Тогда с помощью замены переменных $y = \omega_\sigma(t)$ и $x = \omega_\sigma(t)$, где ω_σ – любой элемент группы $SO(n)$, удовлетворяющий условию $\omega_\sigma(e_1) = \sigma$, формулы (5), (6) приводятся к виду

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= \int_{\mathbb{R}^n} |k(e_1,y)| |y|^{-n/p} (w_*(1/|y|))^{1/p} dy < \infty, \\ \kappa_2 &= \int_{\mathbb{R}^n} |k(x,e_1)| |x|^{-n/p'} (w_*(|x|))^{1/p} dx < \infty. \end{aligned}$$

Учитывая, что $\kappa_1 = \kappa_2$, получим предложение 1.

Замечание 3. В случае степенного веса $w(|x|) = |x|^\alpha$ данная теорема совпадает с теоремой Н.К. Карапетянца, установленной в [2].

Напомним, что функция $w: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ называется *полумультипликативной*, если $w(t_1 t_2) \leq w(t_1)w(t_2)$, $\forall t_1, t_2 \in \mathbb{R}_+$.

Для полумультипликативной функции $w(t)$ справедливо неравенство

$$w_*(t) = \sup_{s>0} \frac{w(ts)}{w(s)} \leq \sup_{s>0} \frac{w(t)w(s)}{w(s)} = w(t). \quad (7)$$

Следствие 1. Пусть $1 \leq p < \infty$, весовая функция w полумультипликативна и ядро $k(x,y)$ оператора K удовлетворяет условию (2), а также условиям:

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= \operatorname{ess\,sup}_{\sigma \in \mathbb{S}_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(\sigma,y)| |y|^{-n/p} (w(1/|y|))^{1/p} dy < \infty, \\ \kappa_2 &= \operatorname{ess\,sup}_{\sigma \in \mathbb{S}_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x,\sigma)| |x|^{-n/p'} (w(|x|))^{1/p} dx < \infty. \end{aligned}$$

Тогда оператор K ограничен в пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$, причем $\|K\varphi\|_{p,w} \leq \kappa_1^{1/p'} \kappa_2^{1/p} \|\varphi\|_{p,w}$.

Доказательство. Из неравенства (7) следует, что $\kappa_1 \leq \kappa_1$ и $\kappa_2 \leq \kappa_2$. И остается лишь применить теорему 1.

В заключение рассмотрим оператор K , действующий в пространстве $L_\infty(\mathbb{R}^n, w)$.

Теорема 2. Пусть ядро $k(x,y)$ оператора K удовлетворяет условию (2), а также условию $\kappa_\infty = \operatorname{ess\,sup}_{\sigma \in \mathbb{S}_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(\sigma,y)| w_*(1/|y|) dy < \infty$.

Тогда оператор K ограничен в пространстве $L_{\infty,w}(\mathbb{R}^n)$, причем

$$\|K\varphi\|_{\infty,w} \leq \kappa_\infty \|\varphi\|_{\infty,w}. \quad (8)$$

Доказательство. Имеем

$$\begin{aligned} |(K\varphi)(x)| w(|x|) &\leq w(|x|) \int_{\mathbb{R}^n} |k(x,y)| |\varphi(y)| dy \leq \\ &\leq \int_{\mathbb{R}^n} |k(x,y)| \frac{w(|x|)}{w(|y|)} |\varphi(y)| w(|y|) dy \leq \|\varphi\|_{\infty,w} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x,y)| \frac{w(|x|)}{w(|y|)} dy. \end{aligned}$$

Сделаем в интеграле замену $y = |x|t$. Тогда получим

$$\begin{aligned} |(K\varphi)(x)| w(|x|) &\leq \|\varphi\|_{\infty,w} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x',t)| \frac{w(|x|)}{w(|x||t|)} dt \leq \\ &\leq \|\varphi\|_{\infty,w} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x',t)| w_*(1/|t|) dt \leq \kappa_\infty \|\varphi\|_{\infty,w}. \end{aligned}$$

Отсюда следует неравенство (8).

Следствие 2. Пусть весовая функция w полумультимпликативна и ядро $k(x, y)$ оператора K удовлетворяет условию (2), а также условию $\kappa_\infty = \operatorname{ess\,sup}_{\sigma \in \mathbb{S}_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(\sigma, y)| w(1/|y|) dy < \infty$.

Тогда оператор K ограничен в пространстве $L_\infty(\mathbb{R}^n, w)$, причем $\|K\varphi\|_{\infty, w} \leq \kappa_\infty \|\varphi\|_{\infty, w}$.

Доказательство. Достаточно учесть, что в силу неравенства (7) $\kappa_\infty \leq \kappa_\infty$, и воспользоваться теоремой 2.

Необходимые условия ограниченности

Установим условия на ядро $k(x, y)$, необходимые для ограниченности оператора K вида (1) в пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$.

Теорема 3. Пусть $1 < p < \infty$, функция $k(x, y)$ однородна степени $(-n)$ и неотрицательна, и оператор K ограничен в пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$. Тогда выполнены условия:

$$\int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_{\mathbb{R}^n} k(\sigma, t) |t|^{-n/p} (w_*(|t|))^{-1/p} dt < \infty, \quad (9)$$

$$\int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_{\mathbb{R}^n} k(t, \sigma) |t|^{-n/p'} (w_*(1/|t|))^{-1/p} dt < \infty. \quad (10)$$

Доказательство проведем в два этапа:

1. Применяя неравенство Гёльдера и учитывая ограниченность оператора K в пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$, получаем неравенство

$$\left| \int_{\mathbb{R}^n} (K\varphi)(x) \psi(x) dx \right| \leq \|K\| \|\varphi\|_{p, w} \|\psi\|_{p', w^{-p'/p}}. \quad (11)$$

Рассмотрим функции

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0, & |x| < 1, \\ |x|^{-n/p-\varepsilon} (w(|x|))^{-1/p}, & |x| > 1, \end{cases}$$

$$\psi(x) = \begin{cases} 0, & |x| < 1, \\ |x|^{-n/p'-\varepsilon p/p'} (w(|x|))^{1/p}, & |x| > 1, \end{cases}$$

и найдем нормы φ и ψ в соответствующих пространствах. Имеем

$$\|\varphi\|_{p, w} = \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\varphi(x)|^p w(|x|) dx \right)^{1/p} = \left(\int_{|x|>1} |x|^{-n-\varepsilon p} dx \right)^{1/p} =$$

$$= (|\mathbb{S}_{n-1}| \int_1^\infty r^{-1-\varepsilon p} dr)^{1/p} = \left(\frac{|\mathbb{S}_{n-1}|}{\varepsilon p} \right)^{1/p};$$

$$\|\psi\|_{p', w^{-p'/p}} = \left(\int_{\mathbb{R}^n} |\psi(x)|^{p'} w(|x|)^{-p'/p} dx \right)^{1/p'} = \left(\int_{|x|>1} |x|^{-n-\varepsilon p} dx \right)^{1/p'} = \left(\frac{|\mathbb{S}_{n-1}|}{\varepsilon p} \right)^{1/p'}.$$

Таким образом,

$$\|\varphi\|_{p, w} \|\psi\|_{p', w^{-p'/p}} = \frac{|\mathbb{S}_{n-1}|}{\varepsilon p}. \quad (12)$$

Преобразуем левую часть неравенства (11). Имеем

$$I = \int_{\mathbb{R}^n} (K\varphi)(x) \psi(x) dx = \int_{\mathbb{R}^n} \psi(x) dx \int_{\mathbb{R}^n} k(x, y) \varphi(y) dy =$$

$$= \int_{|x|>1} |x|^{-n/p'-\varepsilon p/p'} (w(|x|))^{1/p} dx \int_{|y|>1} k(x, y) |y|^{-n/p-\varepsilon} (w(|y|))^{-1/p} dy.$$

Во внутреннем интеграле сделаем замену $y = |x|t$. Пользуясь однородностью функции $k(x, y)$, получим

$$I = \int_{|x|>1} |x|^{-n-\varepsilon p} (w(|x|))^{1/p} dx \int_{|t|>1/|x|} k(x', t) |t|^{-n/p-\varepsilon} (w(|x||t|))^{-1/p} dt.$$

Перейдем к сферическим координатам $x = r\sigma$. Тогда

$$I = \int_1^\infty \int_{\mathbb{S}_{n-1}} r^{-\varepsilon p-1} (w(r))^{1/p} dr d\sigma \int_{|t|>1/r} k(\sigma, t) |t|^{-n/p-\varepsilon} (w(r|t|))^{-1/p} dt =$$

$$= \int_1^\infty \int_{\mathbb{S}_{n-1}} r^{-\varepsilon p-1} dr d\sigma \int_{|t|>1/r} k(\sigma, t) |t|^{-n/p-\varepsilon} \left(\frac{w(r|t|)}{w(r)} \right)^{-1/p} dt \geq$$

$$\geq \int_1^\infty \int_{\mathbb{S}_{n-1}} r^{-\varepsilon p-1} dr d\sigma \int_{|t|>1/r} k(\sigma, t) |t|^{-n/p-\varepsilon} \left(\sup_{r>0} \frac{w(r|t|)}{w(r)} \right)^{-1/p} dt =$$

$$= \int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_1^\infty r^{-\varepsilon p-1} dr \int_{|t|>1/r} k(\sigma, t) |t|^{-n/p-\varepsilon} (w_*(|t|))^{-1/p} dt.$$

Изменим порядок интегрирования:

$$I = \int_{\mathbb{S}_{n-1}} \left(\int_{|t|<1} k(\sigma, t) |t|^{-n/p-\varepsilon} (w_*(|t|))^{-1/p} dt \int_{1/|t|}^{\infty} r^{-\varepsilon p-1} dr + \int_{|t|>1} k(\sigma, t) |t|^{-n/p-\varepsilon} (w_*(|t|))^{-1/p} dt \int_1^{\infty} r^{-\varepsilon p-1} dr \right) d\sigma = \\ = \frac{1}{\varepsilon p} \int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_{\mathbb{R}^n} k(\sigma, t) |t|^{-n/p-\varepsilon} (w_*(|t|))^{-1/p} \max\{1, |t|^{-1}\}^{-\varepsilon p} dt.$$

Подставив в неравенство (11), с учетом (12) получаем

$$\int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_{\mathbb{R}^n} k(\sigma, t) |t|^{-n/p-\varepsilon} (w_*(|t|))^{-1/p} \max\{1, |t|^{-1}\}^{-\varepsilon p} dt \leq \|K\| |\mathbb{S}_{n-1}|.$$

Отсюда на основании теоремы Фату следует условие (9).

2. Так как оператор K ограничен в пространстве $L_{p,w}(\mathbb{R}^n)$, то сопряженный оператор K^* ограничен в пространстве $L_{p',w^{-p'/p}}(\mathbb{R}^n)$. Используя неравенство Гёльдера, запишем неравенство

$$\left| \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_1(x) (K^* \psi_1)(x) dx \right| \leq \|K^*\| \|\varphi_1\|_{p,w} \|\psi_1\|_{p',w^{-p'/p}}. \quad (13)$$

Рассмотрим функции

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} 0, & |x| < 1, \\ |x|^{-n/p-\varepsilon p'/p} (w(|x|))^{-1/p}, & |x| > 1, \end{cases} \\ \psi_1(x) = \begin{cases} 0, & |x| < 1, \\ |x|^{-n/p'-\varepsilon} (w(|x|))^{1/p}, & |x| > 1. \end{cases}$$

Тогда

$$\|\varphi_1\|_{p,w} \|\psi_1\|_{p',w^{-p'/p}} = \left(\int_{|x|>1} |x|^{-n-\varepsilon p'} dx \right)^{1/p} \left(\int_{|x|>1} |x|^{-n-\varepsilon p'} dx \right)^{1/p'} = \frac{|\mathbb{S}_{n-1}|}{\varepsilon p'}.$$

Преобразуем левую часть неравенства (13). Имеем

$$I_1 = \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_1(x) (K^* \psi_1)(x) dx = \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_1(x) dx \int_{\mathbb{R}^n} k(y, x) \psi_1(y) dy = \\ = \int_{|x|>1} |x|^{-n/p-\varepsilon p'/p} (w(|x|))^{-1/p} dx \int_{|y|>1} k(y, x) |y|^{-n/p'-\varepsilon} (w(|y|))^{1/p} dy.$$

Во внутреннем интеграле сделаем замену $y = |x|t$ и воспользуемся однородностью функции $k(x, y)$: $I_1 = \int_{|x|>1} |x|^{-n-\varepsilon p'} (w(|x|))^{-1/p} dx \int_{|t|>1/|x|} k(t, x') |t|^{-n/p'-\varepsilon} (w(|x||t|))^{1/p} dt.$

Перейдем к сферическим координатам $x = r\sigma$. Тогда

$$I_1 = \int_1^{\infty} \int_{\mathbb{S}_{n-1}} r^{-\varepsilon p'-1} dr d\sigma \int_{|t|>1/r} k(t, \sigma) |t|^{-n/p'-\varepsilon} \left(\frac{w(r)}{w(r|t|)} \right)^{-1/p} dt \geq \\ \geq \int_1^{\infty} \int_{\mathbb{S}_{n-1}} r^{-\varepsilon p'-1} dr d\sigma \int_{|t|>1/r} k(t, \sigma) |t|^{-n/p'-\varepsilon} \left(\sup_{r>0} \frac{w(r)}{w(r|t|)} \right)^{-1/p} dt = \\ = \int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_1^{\infty} r^{-\varepsilon p'-1} dr \int_{|t|>1/r} k(t, \sigma) |t|^{-n/p'-\varepsilon} (w_*(1/|t|))^{-1/p} dt.$$

Изменив порядок интегрирования, после преобразований, аналогичных проведенным в части 1, получим $I_1 \geq \frac{1}{\varepsilon p'} \int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_{\mathbb{R}^n} k(t, \sigma) |t|^{-n/p'-\varepsilon} (w_*(1/|t|))^{-1/p} \max\{1, |t|^{-1}\}^{-\varepsilon p'} dt.$

Подставим в неравенство (11)

$$\int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_{\mathbb{R}^n} k(t, \sigma) |t|^{-n/p'-\varepsilon} (w_*(1/|t|))^{-1/p} \max\{1, |t|^{-1}\}^{-\varepsilon p'} dt \leq \|K\| |\mathbb{S}_{n-1}|.$$

Применяя теорему Фату, получаем условие (10).

Следствие 3. Пусть неотрицательная функция $k(x, y)$ удовлетворяет условиям (2) и (3) и оператор K ограничен в пространстве $L_p(\mathbb{R}^n, w)$. Тогда выполнено условие

$$\int_{\mathbb{R}^n} k(e_1, t) |t|^{-n/p} (w_*(|t|))^{-1/p} dt = \int_{\mathbb{R}^n} k(t, e_1) |t|^{-n/p'} (w_*(1/|t|))^{-1/p} dt < \infty. \quad (14)$$

Доказательство. В силу леммы 5 из [11] интегралы в (14) равны. Поэтому достаточно доказать сходимость интеграла из левой части этой формулы. Так как функция $k(x, y)$ инвариантна относительно группы вращений $SO(n)$, то с помощью замены переменных $t = \omega_\sigma(\tau)$, где ω_σ – произвольный элемент группы $SO(n)$, удовлетворяющий условию $\omega_\sigma(e_1) = \sigma$, получаем равенство $\int_{\mathbb{S}_{n-1}} d\sigma \int_{\mathbb{R}^n} k(\sigma, t) |t|^{-n/p} (w_*(|t|))^{-1/p} dt = |\mathbb{S}_{n-1}| \int_{\mathbb{R}^n} k(e_1, \tau) |\tau|^{-n/p} (w_*(|\tau|))^{-1/p} dt.$

Поскольку оператор K ограничен в $L_p(\mathbb{R}^n, w)$, то выполнено условие (9), т.е. интеграл в левой части формулы (14) сходится.

Известно [12, с. 76], что любая функция растяжения обладает свойством полумультимпликативности, т.е. в нашем случае $w_*(|x_1| |x_2|) \leq w_*(|x_1|) w_*(|x_2|)$, $\forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$.

Тогда для любого $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ выполняется неравенство $w_*(1) \leq w_*(|x|) w_*(1/|x|)$.

Таким образом, условие (4), вообще говоря, не совпадает с условием (14). Чтобы они совпадали, нужно, чтобы функция $w_*(|x|)$ удовлетворяла условию мультипликативности, т.е.

$$w_*(|x_1| |x_2|) = w_*(|x_1|)w_*(|x_2|), \quad \forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n.$$

Это заведомо выполнено для степенного веса $w(|x|) = |x|^\alpha$. Этот случай был рассмотрен в работе [2].

Список источников

1. Karapetiants N., Samko S. *Equations with Involution Operators*. Boston; Basel; Berlin: Birkhäuser, 2001. 427 p.
2. Карпетянц Н.К. О необходимых условиях ограниченности оператора с неотрицательным квази-однородным ядром // *Мат. заметки*. 1981. Т. 30, вып. 5. С. 787–794.
3. Авсянкин О.Г. Проекционный метод для интегральных операторов с однородными ядрами, возмущенных односторонними мультипликативными сдвигами // *Изв. вузов. Математика*. 2015. № 2. С. 10–17.
4. Авсянкин О.Г. О C^* -алгебре интегральных операторов с однородными ядрами и осциллирующими коэффициентами // *Мат. заметки*. 2016. Т. 99, вып. 3. С. 323–332.
5. Авсянкин О.Г., Каменских Г.А. Об алгебре, порожденной вольтерровскими интегральными операторами с однородными ядрами и непрерывными коэффициентами // *Владикавказский мат. журн.* 2022. Т. 24, вып. 4. С. 19–29. <https://doi.org/10.46698/p3569-9057-4562-o>
6. Денисенко В. В., Деундяк В. М. Фредгольмовость интегральных операторов с однородными ядрами компактного типа L_2 -пространстве на группе Гейзенберга // *Тр. МИАН*. 2020. Т. 308. С. 167–180. EDN: RLUXZV. <https://doi.org/10.4213/tm4058>
7. Авсянкин О.Г., Перетьякин Ф.Г. Об ограниченности и компактности многомерных интегральных операторов с однородными ядрами // *Изв. вузов. Математика*. 2013. № 11. С. 64–68. EDN: RCLYRN.
8. Авсянкин О.Г. Об интегральных операторах с однородными ядрами в весовых пространствах Лебега на группе Гейзенберга // *Мат. заметки*. 2023. Т. 114, вып. 1. С. 144–148. EDN: LOATUV. <https://doi.org/10.4213/mzm13914>
9. Мирошникова Е.И. Ограниченность и обратимость интегральных операторов с однородными ядрами компактного типа в некоторых весовых L_p -пространствах // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2012. № 2. С. 22–26. EDN: OXHTMT.
10. Авсянкин О.Г. Об интегральных операторах типа Вольтерра с однородными ядрами в весовых L_p -пространствах // *Изв. вузов. Математика*. 2017. № 11. С. 3–12. . EDN: ZGQRVT.
11. Умархаджиев С.М. Интегральные операторы с однородными ядрами в гранд-пространствах Лебега // *Мат. заметки*. 2017. Т. 102, вып. 5. С. 775–788. EDN: ZRSFQN. <https://doi.org/10.4213/mzm11640>
12. Крейн С.Г., Петунин Ю.И., Семенов Е.М. *Интерполяция линейных операторов*. М.: Наука, 1978. 400 с. EDN: SHJALT.

References

1. Karapetiants N., Samko S. *Equations with Involution Operators*. Boston; Basel; Berlin: Birkhäuser; 2001. 427 p.
2. Karapetiants N.K. Necessary conditions for boundedness of an operator with a nonnegative quasihomogeneous kernel. *Math. Notes*. 1981;30(5):893-897. <https://doi.org/10.1007/BF01140227>
3. Avsyankin O.G. Projection method for integral operators with homogeneous kernels perturbed by one-sided multiplicative shifts. *Russian Mathematics*. 2015;59(2):7-13. <https://doi.org/10.3103/S1066369X15020024>
4. Avsyankin O.G. C^* -algebra of integral operators with homogeneous kernels and oscillating coefficients. *Math. Notes*. 2016;99(3-4):345-353.
5. Avsyankin O.G., Kamenskikh G. A. On the algebra generated by Volterra integral operators with homogeneous kernels and continuous coefficients. *Vladikavkaz Mathematical Journal*. 2022;24(4):19-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.46698/p3569-9057-4562-o>
6. Denisenko V.V., Deundyak V.M. Fredholm property of integral operators with homogeneous kernels of compact type in the L_2 space on the Heisenberg group. *Proc. Steklov Inst. Math*. 2020;308(1):155-167.
7. Avsyankin O.G., Peretyat'kin F.G. Boundedness and compactness of multidimensional integral operators with homogeneous kernels. *Russian Mathematics*. 2013;57(11):57-60. EDN: SLDDZT. <https://doi.org/10.3103/S1066369X13110054>
8. Avsyankin O.G. On integral operators with homogeneous kernels in weighted Lebesgue spaces on the Heisenberg group. *Math. Notes*. 2023;114(1):117-121. <https://doi.org/10.1134/S000143462307012X>

9. Mirosnikova E.I. Boundedness and invertibility of integral operators with homogeneous kernels of compact type in some weighted L_p -spaces. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2012;(2):22-26. (In Russ.). EDN: OXHTMT.

10. Avsyankin O.G. Volterra type integral operators with homogeneous kernels in weighted L_p -spaces. *Russian Mathematics*. 2017;61(11):5-9. EDN: PSSCEN. <https://doi.org/10.3103/S1066369X17110019>

11. Umarchadzhiev S.M. Integral operators with homogeneous kernels in grand Lebesgue spaces. *Math. Notes*. 2017;102(5):710-721. EDN: XXYSXR. <https://doi.org/10.1134/S0001434617110104>

12. Krein S.G., Petunin Yu.I., Semenov E.M. *Interpolation of linear operators*. Moscow: Science; 1978. 400 p. (In Russ.). EDN: SHJALT.

Информация об авторах

О.Г. Авсянкин – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой дифференциальных и интегральных уравнений Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, главный научный сотрудник Регионального научно-образовательного математического центра ЮФУ.

Г.А. Тихонова – аспирант кафедры дифференциальных и интегральных уравнений Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

Information about the authors

O.G. Avsyankin – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science; Chief Researcher of Regional Scientific and Educational Mathematical Center, SFedU.

G.A. Tikhonova – Postgraduate Student, Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.

Статья поступила в редакцию 22.04.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 22.04.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 10.07.2025.

Научная статья

УДК 519.63

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-17-24>

КОМПАКТНО-РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ КОЛЕБАНИЯ СТРУНЫ

Мурат Хамидбиевич Бештоков

*Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра
Российской академии наук, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия
beshtokov-murat@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2968-9211>*

Аннотация. Исследуется первая начально-краевая задача для уравнения колебания струны с переменными коэффициентами. Для её численного решения построена компактно-разностная схема четвёртого порядка точности по h и второго – по τ . Компактно-разностные схемы являются мощным инструментом численного моделирования уравнения колебания струны. Они позволяют достичь высокой точности при сравнительно небольшом количестве расчетных узлов, что особенно важно для задач, связанных с волновыми процессами. Методом энергетических неравенств получена априорная оценка решения в разностной трактовке. Из этой оценки следуют единственность и устойчивость решения по правой части и начальным данным. При предположении существования точного решения исходной дифференциальной задачи в классе достаточно гладких функций, а также в силу её линейности из полученной априорной оценки вытекает сходимость решения построенной разностной задачи к решению исходной дифференциальной задачи со скоростью $O(h^4 + \tau^2)$.

Ключевые слова: уравнение колебания струны, первая краевая задача, компактно-разностные схемы, априорная оценка в разностной форме, устойчивость и сходимость разностных схем

Для цитирования: Бештоков М.Х. Компактно-разностная схема для уравнения колебания струны // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 17–24. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-17-24>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

COMPACT-DIFFERENCE SCHEME FOR THE EQUATION OF STRING OSCILLATION

Murat Kh. Beshtokov

*Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center,
Russian Academy of Sciences, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia
beshtokov-murat@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2968-9211>*

Abstract. The first initial-boundary value problem for the equation of string oscillation with variable coefficients is investigated. For the numerical solution of the problem, a compact-difference scheme of the fourth order of accuracy in h and of the second order of accuracy in τ is constructed. Compact-difference schemes are a powerful tool for numerical modeling of the equation of string oscillation. They allow achieving high accuracy with a relatively small number of computational nodes, which is especially important for problems related to wave processes. An a priori estimate of the solution in the difference interpretation is obtained using the method of energy inequalities. This estimate implies the uniqueness and stability of the solution with respect to the right-hand side and the initial data. Assuming the existence of an exact solution to the original differential problem in

© Бештоков М.Х., 2025

the class of sufficiently smooth functions, and also due to the linearity of the problem under consideration, the obtained a priori estimate implies the convergence of the solution of the constructed difference problem to the solution of the original differential problem with a rate of $O(h^4 + \tau^2)$.

Keywords: string equation of oscillation, first boundary value problem, compact-difference schemes, a priori estimate in difference form, stability and convergence of difference schemes

For citation: Beshtokov M.Kh. Compact-Difference Scheme for the Equation of String Oscillation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):17-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-17-24>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Дифференциальные уравнения, описывающие колебания струны, представляют собой важный инструмент для понимания множества физических явлений, таких как звук, волны и механика. Эти знания играют ключевую роль в проектировании музыкальных инструментов, позволяя создавать гармоничные звуки, а также в строительстве и механике для анализа структур, подверженных колебаниям, в частности мостов и зданий, чтобы предотвратить возможные разрушения. Знания о колебаниях помогают инженерам разрабатывать более устойчивые конструкции, способные выдерживать внешние воздействия [1].

Компактно-разностные схемы занимают важное место в численных методах решения волновых уравнений, предоставляя эффективные и точные подходы для моделирования динамических процессов. Компактно-разностные схемы используют разностные аппроксимации производных, которые учитывают значения функции в нескольких узлах, что дает возможность достичь высокой точности при меньшем количестве узлов и особенно важно для волновых уравнений, где требуются точные решения для описания динамики волн [2–4].

Одной из ключевых особенностей компактно-разностных схем является то, что они приводят к системе линейных уравнений с трёхдиагональной матрицей коэффициентов. Это позволяет использовать эффективные алгоритмы (метод прогонки или метод трёхдиагональной матрицы) для быстрого решения полученной системы. Трёхдиагональная структура матрицы обеспечивает как экономию памяти, так и ускорение вычислений, что особенно важно при решении больших систем уравнений [5, 6].

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию компактно-разностных схем для волнового уравнения. Методом энергетических неравенств получена априорная оценка в разностной трактовке, откуда следуют единственность и устойчивость решения по правой части и начальным данным, а также сходимости решения построенной разностной задачи к решению исходной дифференциальной задачи [7, 8].

Постановка задачи

В замкнутом прямоугольнике $\bar{D} = \{(x, t) : 0 \leq x \leq l, 0 \leq t \leq T\}$ рассмотрим первую начально-краевую задачу для уравнения колебания струны

$$\begin{aligned} u_{tt} &= k(t)u_{xx} - q(t)u + f(x, t), & 0 < x < l, & \quad 0 < t \leq T, \\ u(0, t) &= u(l, t) = 0, & & \quad 0 \leq t \leq T, \\ u(x, 0) &= u_0(x), \quad u_t(x, 0) = u_1(x), & & \quad 0 \leq x \leq l, \end{aligned} \tag{1}$$

где $k, q \in C^1[0, T]$, $f \in C^{4,1}(\bar{D})$, $u \in C^{6,4}(\bar{D})$, $0 < c_0 \leq k, q \leq c_1$, $|k_t, q_t| \leq c_2$.

Здесь и далее относительно решения дифференциальной задачи будем предполагать, что решение существует, единственно и обладает всеми непрерывными в \bar{Q}_T производными, необходимыми по ходу изложения.

Устойчивость и сходимость разностной схемы

Для численного решения применим метод конечных разностей. Для этих целей введём равномерную сетку $\bar{\omega}_{h\tau} = \bar{\omega}_h \times \bar{\omega}_\tau = \{(x_i, t_j) \in \bar{D}\}$, где

$$\bar{\omega}_h = \left\{ x_i = ih, i = \overline{0, N}, h = \frac{l}{N} \right\}, \quad \bar{\omega}_\tau = \left\{ t_j = j\tau, j = \overline{0, J_0}, \tau = \frac{T}{J_0} \right\}.$$

На сетке $\bar{\omega}_{h\tau}$ задаче (1) поставим в соответствие разностную схему порядка аппроксимации $O(h^4 + \tau^2)$:

$$H_h y_{\bar{t}t} = a y_{\bar{x}x}^{(\sigma, \sigma)} - d H_h y^{(\sigma, \sigma)} + H_h \phi, \quad (x, t) \in \omega_{h, \tau}, \quad (2)$$

$$y(0, t) = y(l, t) = 0, \quad t \in \bar{\omega}_\tau, \quad (3)$$

$$y(x, 0) = u_0(x), \quad x \in \bar{\omega}_h, \quad y_t(x, 0) = \bar{u}_1(x), \quad x \in \omega_h,$$

где $a = a^j = k(t_{j+\frac{1}{2}})$, $d = d^j = q(t_{j+\frac{1}{2}})$, $a^{(-1)} = a^{j-1}$, $\phi_i^j = f_i^{j+\frac{1}{2}} = f(x_i, t_{j+\frac{1}{2}})$,

$$H_h y_i^j = \frac{1}{12} (y_{i+1}^j + 10y_i^j + y_{i-1}^j) = y_i^j + \frac{h^2}{12} y_{\bar{x}x, i}^j, \quad \hat{y} = y^{j+1}, \quad \check{y} = y^{j-1},$$

$$\bar{u}_1(x) = u_1(x) + \frac{\tau}{2} [k(0)u''(x, 0) - q(0)u(x, 0) + f(x, 0)], \quad x \in \omega_h,$$

$$y^{(\sigma, \sigma)} = \sigma \hat{y} + (1 - 2\sigma)y + \sigma \check{y} = y + \sigma \tau^2 y_{\bar{t}t}, \quad y_t = 0,5(\hat{y}_t + \check{y}_t), \quad y = y_i^j = y(x_i, t_j).$$

Справедливы следующие леммы.

Лемма 1. Для всякой функции $y(x)$, заданной на равномерной сетке $\bar{\omega}_h$, справедлива оценка $\frac{h^2}{4} \|y_{\bar{x}}\|_0^2 \leq \|y\|_0^2$ при $y_0 = y_N = 0$.

Доказательство. Рассуждения проведём по аналогии с [9], тогда справедливо следующее преобразование:

$$(y_{\bar{x}, i})^2 = \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{h} \right)^2 \leq \frac{2}{h^2} (y_i^2 + y_{i-1}^2).$$

Умножим теперь обе части на h и просуммируем по i от 1 до N

$$\begin{aligned} \text{Chief } \sum_{i=1}^N (y_{\bar{x}, i})^2 h &\leq \frac{2}{h^2} \sum_{i=1}^N (y_i^2 + y_{i-1}^2) h = \frac{2}{h^2} \left[\sum_{i=1}^N (y_i^2) h + \sum_{i=1}^N (y_{i-1}^2) h \right] = \frac{2}{h^2} \left[2 \sum_{i=1}^{N-1} y_i^2 h + (y_0^2 + y_N^2) h \right] = \\ &= \frac{4}{h^2} \left[\sum_{i=1}^{N-1} y_i^2 h + 0,5h(y_0^2 + y_N^2) \right] = \frac{4}{h^2} \|y\|_0^2 + 0,5h(y_0^2 + y_N^2). \end{aligned}$$

Следовательно, $\|y_{\bar{x}}\|_0^2 \leq \frac{4}{h^2} \|y\|_0^2 + 0,5h(y_0^2 + y_N^2)$ или $\frac{h^2}{4} \|y_{\bar{x}}\|_0^2 \leq \|y\|_0^2$ при $y_0 = y_N = 0$.

Лемма 2. Для всякой функции $y(x)$, заданной на равномерной сетке $\bar{\omega}_{h\tau}$, справедлива оценка $yy_t = \frac{1}{4}(y^2 + \check{y}^2)_t - \frac{\tau^2}{4} (y_t^2)_t$.

Доказательство. Рассуждения проведём по аналогии с [9].

$$\begin{aligned} yy_t &= y^j \frac{y^{j+1} - y^{j-1}}{2\tau} = \frac{y^{j+1}y^j - y^j y^{j-1}}{2\tau} = \frac{1}{2} (y^j y^{j-1})_t = \frac{1}{4} (2y^j y^{j-1})_t = \\ &= \frac{1}{4} ((y^j)^2 + (y^{j-1})^2 - (y^j)^2 + 2y^j y^{j-1} - (y^{j-1})^2)_t = \\ &= \frac{1}{4} ((y^j)^2 + (y^{j-1})^2 - (y^j - y^{j-1})^2)_t = \frac{1}{4} (y^2 + \check{y}^2)_t - \frac{\tau^2}{4} (y_t^2)_t. \end{aligned}$$

Следовательно, $yy_t = \frac{1}{4}(y^2 + \tilde{y}^2)_t - \frac{\tau^2}{4}(y_t^2)_t$.

Найдём априорную оценку решения разностной задачи (2), (3). Для этого воспользуемся методом энергетических неравенств. Умножим тогда (2) скалярно на $2\mathcal{Y}_t^o = \tau(\hat{y}_t + y_t)$:

$$\left(H_h y_{\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) = \left(ay_{\tilde{x}\tilde{x}}^{(\sigma,\sigma)}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) - \left(dH_h y^{(\sigma,\sigma)}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) + \left(H_h \phi, 2\mathcal{Y}_t^o \right), \quad (4)$$

где нормы и скалярные произведения вводятся следующим образом:

$$(y, v) = \sum_{i=1}^{N-1} y_i v_i h, \quad (1, y^2) = \|y\|_0^2, \quad (y, v] = \sum_{i=1}^N y_i v_i h, \quad (1, y^2] = \|y\|_0^2.$$

Пользуясь леммами 1, 2 и неравенством [8] $\frac{1}{3} \|y\|_0^2 \leq \|H_h y\|_0^2 \leq \frac{10}{9} \|y\|_0^2$, (справедливо для всякой функции $y(x) \in \bar{\omega}_{h\tau}$ при $y_0 = y_N = 0$), преобразуем каждое слагаемое, входящее в (4):

$$\left(H_h y_{\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) = \left(y_{\tilde{t}t} + \frac{h^2}{12} y_{\tilde{x}\tilde{x}\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) = \left(y_{\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) + \left(\frac{h^2}{12} y_{\tilde{x}\tilde{x}\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right). \quad (5)$$

Преобразуем слагаемые, входящие в правую часть (5):

$$\left(y_{\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) = (\hat{y}_t - y_t, \hat{y}_t + y_t) = (1, \hat{y}_t^2 - y_t^2) = (\tau, (y_t^2)_t) = (\tau, \tilde{y}_t^2)_t = \tau (\|y_t\|_0^2)_t, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{h^2}{12} \left(y_{\tilde{x}\tilde{x}\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) &= -\frac{h^2}{12} \left(y_{\tilde{x}\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_{\tilde{x}t}^o \right) = -\frac{h^2}{12} (1, (\hat{y}_{\tilde{x}t} - y_{\tilde{x}t})(\hat{y}_{\tilde{x}t} + y_{\tilde{x}t})) = \\ &= -\frac{h^2}{12} (1, \hat{y}_{\tilde{x}t}^2 - y_{\tilde{x}t}^2) = -\frac{h^2 \tau}{12} (1, (y_{\tilde{x}t}^2)_t) = -\frac{h^2 \tau}{12} (\|y_{\tilde{x}t}\|_0^2)_t. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая (6), (7), из (5) находим

$$\begin{aligned} \left(H_h y_{\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) &= \tau (\|y_t\|_0^2)_t - \frac{h^2 \tau}{12} (\|y_{\tilde{x}t}\|_0^2)_t, \\ \left(ay_{\tilde{x}\tilde{x}}^{(\sigma,\sigma)}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) &= -\left(ay_{\tilde{x}}^{(\sigma,\sigma)}, 2\mathcal{Y}_{\tilde{x}t}^o \right) = -\left(2a\tau, y_{\tilde{x}} y_{\tilde{x}t}^o \right) - \left(2\sigma\tau^3 a, y_{\tilde{x}\tilde{t}t} y_{\tilde{x}t}^o \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Преобразуем слагаемые, входящие в правую часть (8):

$$\begin{aligned} -\left(2a\tau, y_{\tilde{x}} y_{\tilde{x}t}^o \right) &= -\left(\frac{\tau}{2} a, (y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2)_t - \tau^2 (y_{\tilde{x}t}^2)_t \right) = -\frac{\tau}{2} (a^{(-1)}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2 - \tau^2 y_{\tilde{x}t}^2)_t + \\ &+ \frac{\tau}{2} (a_t, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2 - \tau^2 y_{\tilde{x}t}^2), \\ -\left(2\sigma\tau^3 a, y_{\tilde{x}\tilde{t}t} y_{\tilde{x}t}^o \right) &= -\left(\tau^2 \sigma a, (\hat{y}_{\tilde{x}t} - y_{\tilde{x}t})(\hat{y}_{\tilde{x}t} + y_{\tilde{x}t}) \right) = -\left(\sigma\tau^2 a, \hat{y}_{\tilde{x}t}^2 - y_{\tilde{x}t}^2 \right) = \\ &= -\sigma\tau^3 (a, (y_{\tilde{x}t}^2)_t) = -\sigma\tau^3 (a^{(-1)}, y_{\tilde{x}t}^2)_t + \sigma\tau^3 (a_t, y_{\tilde{x}t}^2). \end{aligned} \quad (9)$$

Ввиду (9) из (8) получаем

$$\begin{aligned} \left(ay_{\tilde{x}\tilde{x}}^{(\sigma,\sigma)}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) &= -\frac{\tau}{2} (a^{(-1)}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2 - \tau^2 y_{\tilde{x}t}^2)_t + \frac{\tau}{2} (a_t, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2 - \tau^2 y_{\tilde{x}t}^2) - \\ &- \sigma\tau^3 (a^{(-1)}, y_{\tilde{x}t}^2)_t + \sigma\tau^3 (a_t, y_{\tilde{x}t}^2) = -\tau \left(\frac{a^{(-1)}}{2}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2 \right)_t - \\ &- \tau \left(a^{(-1)}, \tau^2 \left(\sigma - \frac{1}{2} \right) y_{\tilde{x}t}^2 \right)_t + \tau \left(\frac{a_t}{2}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2 \right) + \tau \left(a_t, \tau^2 \left(\sigma - \frac{1}{2} \right) y_{\tilde{x}t}^2 \right), \\ -\left(dH_h y^{(\sigma,\sigma)}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) &= -\left(dH_h y + d\sigma\tau^2 H_h y_{\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) = \\ &= -\left(2d\tau, yy_t \right) - \left(\sigma\tau^2 d, 2\mathcal{Y}_{\tilde{t}t} y_t^o \right) - \frac{h^2}{12} \left(dy_{\tilde{x}\tilde{x}}, 2\mathcal{Y}_t^o \right) - \frac{h^2}{12} \left(\sigma\tau^2 dy_{\tilde{x}\tilde{x}\tilde{t}t}, 2\mathcal{Y}_t^o \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Преобразуем слагаемые, входящие в правую часть (10):

$$\begin{aligned}
 & -\left(2d\tau, yy_t^o\right) = -\frac{\tau}{2}\left(d, \left(y^2 + \tilde{y}^2\right)_t - \tau^2\left(y_t^2\right)_t\right) = -\frac{\tau}{2}\left(d^{(-1)}, y^2 + \tilde{y}^2 - \tau^2 y_t^2\right)_t + \\
 & + \frac{\tau}{2}\left(d_t, y^2 + \tilde{y}^2 - \tau^2 y_t^2\right), \\
 & -\frac{h^2}{12}\left(dy_{\tilde{x}\tilde{x}}, 2\tau y_t^o\right) = \frac{h^2}{12}\left(d, 2\tau y_{\tilde{x}\tilde{x}} y_{\tilde{x}t}^o\right) = \frac{h^2\tau}{24}\left(d, \left(y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2\right)_t - \tau^2\left(y_{\tilde{x}t}^2\right)_t\right) = \\
 & = \frac{h^2\tau}{24}\left(d^{(-1)}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2 - \tau^2 y_{\tilde{x}t}^2\right)_t - \frac{h^2\tau}{24}\left(d_t, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2 - \tau^2 y_{\tilde{x}t}^2\right), \\
 & -\left(\sigma\tau^2 d, 2\tau y_{\tilde{t}\tilde{t}} y_t^o\right) = -\left(\tau^2 \sigma d, (\hat{y}_{\tilde{t}} - y_{\tilde{t}})(\hat{y}_{\tilde{t}} + y_{\tilde{t}})\right) = -\left(\tau^2 \sigma d, \hat{y}_{\tilde{t}}^2 - y_{\tilde{t}}^2\right) = \\
 & = -\left(\tau^3 \sigma d, \left(y_{\tilde{t}}^2\right)_t\right) = -\sigma\tau^3\left(d^{(-1)}, y_{\tilde{t}}^2\right)_t + \sigma\tau^3\left(d_t, y_{\tilde{t}}^2\right). \tag{11} \\
 & -\frac{h^2}{12}\left(\sigma\tau^2 dy_{\tilde{x}\tilde{t}\tilde{t}}, 2\tau y_t^o\right) = \frac{h^2}{12}\left(d\sigma\tau^2, 2\tau y_{\tilde{t}\tilde{t}} y_{\tilde{x}t}^o\right) = \frac{h^2}{12}\left(d\sigma\tau^2, (\hat{y}_{\tilde{x}\tilde{t}} - y_{\tilde{x}\tilde{t}})(\hat{y}_{\tilde{x}\tilde{t}} + y_{\tilde{x}\tilde{t}})\right) = \\
 & = \frac{h^2}{12}\left(d\sigma\tau^2, \hat{y}_{\tilde{x}\tilde{t}}^2 - y_{\tilde{x}\tilde{t}}^2\right) = \frac{h^2}{12}\left(d\sigma\tau^3, \left(y_{\tilde{x}\tilde{t}}^2\right)_t\right) = \frac{h^2}{12}\sigma\tau^3\left(d^{(-1)}, y_{\tilde{x}\tilde{t}}^2\right)_t - \frac{h^2}{12}\sigma\tau^3\left(d_t, y_{\tilde{x}\tilde{t}}^2\right).
 \end{aligned}$$

С учетом (11) из (10) находим

$$\begin{aligned}
 & -\left(dH_{hy^{(\sigma, \sigma)}}, 2\tau y_t^o\right) = -\frac{\tau}{2}\left(d^{(-1)}, y^2 + \tilde{y}^2\right)_t - \frac{\tau}{2}\left(d^{(-1)}, \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 y_t^2\right)_t + \\
 & + \frac{\tau}{2}\left(d_t, y^2 + \tilde{y}^2\right) + \frac{\tau}{2}\left(d_t, \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 y_t^2\right) + \frac{h^2\tau}{24}\left(d^{(-1)}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2\right)_t + \\
 & + \frac{h^2\tau}{24}\left(d^{(-1)}, \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 y_{\tilde{x}t}^2\right)_t - \frac{h^2\tau}{24}\left(d_t, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2\right) - \frac{h^2\tau}{24}\left(d_t, \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 y_{\tilde{x}t}^2\right), \tag{12}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(H_h\phi, 2\tau y_t^o\right) = \tau\left(H_h\phi, \hat{y}_{\tilde{t}} + y_{\tilde{t}}\right) \leq \tau\left(1, (H_h\phi)^2 + \frac{1}{4}(\hat{y}_{\tilde{t}} + y_{\tilde{t}})^2\right) \leq \\
 & \leq \tau\left(1, (H_h\phi)^2 + \frac{1}{2}\hat{y}_{\tilde{t}}^2 + \frac{1}{2}y_{\tilde{t}}^2\right) = \tau\|H_h\phi\|_0^2 + \frac{\tau}{2}\left(\|\hat{y}_{\tilde{t}}\|_0^2 + \|y_{\tilde{t}}\|_0^2\right) \leq \\
 & \leq \frac{10}{9}\|\phi\|_0^2 \tau + \frac{\tau}{2}\left(\|\hat{y}_{\tilde{t}}\|_0^2 + \|y_{\tilde{t}}\|_0^2\right).
 \end{aligned}$$

Учитывая полученные оценки (5)–(12), из (4) находим

$$\begin{aligned}
 & \tau\left(\|y_{\tilde{t}}\|_0^2\right)_t - \frac{h^2\tau}{12}\left(\|y_{\tilde{x}\tilde{t}}\|_0^2\right)_t + \tau\left(\frac{a^{(-1)}}{2}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2\right)_t + \tau\left(a^{(-1)}, \tau^2\left(\sigma - \frac{1}{2}\right)y_{\tilde{x}\tilde{t}}^2\right)_t + \\
 & + \frac{\tau}{2}\left(d^{(-1)}, y^2 + \tilde{y}^2\right)_t + \tau\left(d^{(-1)}, \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 y_t^2\right)_t - \\
 & - \frac{h^2\tau}{24}\left(d^{(-1)}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2\right)_t - \frac{h^2\tau}{12}\left(d^{(-1)}, \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 y_{\tilde{x}\tilde{t}}^2\right)_t \leq \\
 & \leq \tau M_9\left(\|\hat{y}_{\tilde{t}}\|_0^2 + \|y_{\tilde{t}}\|_0^2\right) + \tau\left(\frac{a_{\tilde{t}}}{2}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2\right) + \tau\left(a_{\tilde{t}}, \tau^2\left(\sigma - \frac{1}{2}\right)y_{\tilde{x}\tilde{t}}^2\right) + \frac{\tau}{2}\left(d_{\tilde{t}}, y^2 + \tilde{y}^2\right) + \\
 & + \tau\left(d_{\tilde{t}}, \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 y_t^2\right) - \frac{h^2\tau}{24}\left(d_{\tilde{t}}, y_{\tilde{x}}^2 + \tilde{y}_{\tilde{x}}^2\right) - \frac{h^2\tau}{12}\left(d_{\tilde{t}}, \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 y_{\tilde{x}\tilde{t}}^2\right) + \frac{10}{9}\|\phi\|_0^2 \tau. \tag{13}
 \end{aligned}$$

Просуммируем (13) по j от 1 до j :

$$\begin{aligned} & \left(1 + \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 c_0\right) \|y_{\bar{i}}\|_0^2 + \frac{c_0}{2} \left(1 - \frac{h^2}{12}\right) (\|y_{\bar{x}}\|_0^2 + \|\tilde{y}_{\bar{x}}\|_0^2) + \\ & + \frac{c_0}{2} (\|y\|_0^2 + \|\tilde{y}\|_0^2) + \left(c_0 \tau^2 \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \left(1 - \frac{h^2}{12}\right) - \frac{h^2}{12}\right) \|y_{\bar{x}\bar{i}}\|_0^2 \leq M_{10} \sum_{j=1}^j [\|\hat{y}_{\bar{i}}\|_0^2 + \|y_{\bar{i}}\|_0^2 + \\ & + \frac{c_2}{2} \left(1 - \frac{h^2}{12}\right) (\|y_{\bar{x}}\|_0^2 + \|\tilde{y}_{\bar{x}}\|_0^2) + \frac{c_2}{2} (\|y\|_0^2 + \|\tilde{y}\|_0^2) + \left[c_2 \tau^2 \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \left(1 - \frac{h^2}{12}\right)\right] \|y_{\bar{x}\bar{i}}\|_0^2 + \\ & + \|\phi\|_0^2] \tau + M_{11} \left[\left(1 + \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 c_2\right) \|y_{\bar{i}}^1\|_0^2 + \frac{c_2}{2} \left(1 - \frac{h^2}{12}\right) (\|y_{\bar{x}}^1\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^0\|_0^2) + \right. \\ & \left. + \frac{c_2}{2} (\|y^1\|_0^2 + \|y^0\|_0^2) + c_2 \left(\tau^2 \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \left[1 - \frac{h^2}{12}\right] - \frac{h^2}{12}\right) \|y_{\bar{x}\bar{i}}^1\|_0^2\right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Выбирая $\sigma \geq \frac{1}{2}$, $h \leq h_0 = \sqrt{\frac{3c_0}{c_0 c_1 + 1}} \tau$, из (14) находим

$$\begin{aligned} & \|y_{\bar{i}}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}\|_0^2 + \|\tilde{y}_{\bar{x}}\|_0^2 + \|y\|_0^2 + \|\tilde{y}\|_0^2 + \tau^2 \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \|y_{\bar{x}\bar{i}}\|_0^2 \leq M_{12} \sum_{j'=1}^j [\|\hat{y}_{\bar{i}}\|_0^2 + \\ & + \|y_{\bar{i}}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}\|_0^2 + \|\tilde{y}_{\bar{x}}\|_0^2 + \|y\|_0^2 + \|\tilde{y}\|_0^2 + \tau^2 \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \|y_{\bar{x}\bar{i}}\|_0^2] \tau + M_{13} \left[\sum_{j'=1}^j \|\phi\|_0^2 \tau + \right. \\ & \left. + \|y_{\bar{i}}^1\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^1\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^0\|_0^2 + \|y^1\|_0^2 + \|y^0\|_0^2 + \tau^2 \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \|y_{\bar{x}\bar{i}}^1\|_0^2\right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Преобразуем $\sum_{j'=1}^j (\|\hat{y}_{\bar{i}}\|_0^2 + \|y_{\bar{i}}\|_0^2) \tau$:

$$\begin{aligned} & \sum_{j'=1}^j (\|\hat{y}_{\bar{i}}\|_0^2 + \|y_{\bar{i}}\|_0^2) \tau = \sum_{j'=1}^j \|y_{\bar{i}}^{j'+1}\|_0^2 \tau + \sum_{j'=1}^j \|y_{\bar{i}}^{j'}\|_0^2 \tau = \sum_{j'=2}^{j+1} \|y_{\bar{i}}^{j'}\|_0^2 \tau + \sum_{j'=1}^j \|y_{\bar{i}}^{j'}\|_0^2 \tau = \\ & = \tau \|y_{\bar{i}}^{j+1}\|_0^2 + \tau \|y_{\bar{i}}^1\|_0^2 + 2 \sum_{j'=2}^j \|y_{\bar{i}}^{j'}\|_0^2 \tau \leq \tau \|y_{\bar{i}}^{j+1}\|_0^2 + \tau \|y_{\bar{i}}^1\|_0^2 + 2 \sum_{j'=1}^j \|y_{\bar{i}}^{j'}\|_0^2 \tau. \end{aligned} \quad (16)$$

Принимая во внимание (16), из (15) находим

$$\begin{aligned} & (1 - M_{12} \tau) \|y_{\bar{i}}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}\|_0^2 + \|\tilde{y}_{\bar{x}}\|_0^2 + \|y\|_0^2 + \|\tilde{y}\|_0^2 + \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \tau^2 \|y_{\bar{x}\bar{i}}\|_0^2 \leq \\ & \leq M_{14} \sum_{j'=1}^j \left[\|y_{\bar{i}}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}\|_0^2 + \|\tilde{y}_{\bar{x}}\|_0^2 + \|y\|_0^2 + \|\tilde{y}\|_0^2 + \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \tau^2 \|y_{\bar{x}\bar{i}}\|_0^2\right] \tau + \\ & + M_{15} \left[\sum_{j'=1}^j \|\phi\|_0^2 \tau + \|y_{\bar{i}}^1\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^1\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^0\|_0^2 + \|y^1\|_0^2 + \|y^0\|_0^2 + \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \tau^2 \|y_{\bar{x}\bar{i}}^1\|_0^2\right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Выбирая $\tau \leq \tau_0 = \frac{1}{2M_{12}}$, из (17) получаем

$$\|y^{j+1}\|_1^2 \leq M_{16} \sum_{j'=1}^j \|y^{j'}\|_1^2 \tau + M_{17} \left[\sum_{j'=1}^j \|\phi^{j'}\|_0^2 \tau + \|y^1\|_1^2\right], \quad (18)$$

где $\|y\|_1^2 = \|y_{\bar{i}}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}\|_0^2 + \|\tilde{y}_{\bar{x}}\|_0^2 + \|y\|_0^2 + \|\tilde{y}\|_0^2 + \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) \tau^2 \|y_{\bar{x}\bar{i}}\|_0^2$.

Применяя разностный аналог леммы Гронуолла [10, с. 171], из (18) получаем

$$\|y^{j+1}\|_1^2 \leq M_{18} \left[\sum_{j'=1}^j \|\phi^{j'}\|_0^2 \tau + \|y^1\|_1^2 \right], \quad (19)$$

где M_i , ($i=1, 2, 3, \dots$) – положительные постоянные, не зависящие от h и τ .

Из оценки (19) следует непрерывная и равномерная зависимость решения задачи (2), (3) от входных данных. При предположении существования точного решения исходной дифференциальной задачи в классе достаточно гладких функций, в силу линейности рассматриваемой задачи следует сходимость решения задачи (2), (3) к решению исходной

дифференциальной задачи со скоростью $O(h^4 + \tau^2)$ при $\sigma \geq \frac{1}{2}$, $h \leq \sqrt{\frac{3c_0}{c_0c_1+1}}\tau$,

$h \leq h_0(c_0, c_1, c_2, \sigma, T)$, $\tau \leq \tau_0(c_0, c_1, c_2, \sigma, T)$ в норме $\|y\|_1$, где

$$\|y\|_1 = \left[\|y_{\bar{t}}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}\|_0^2 + \|\bar{y}_{\bar{x}}\|_0^2 + \|y\|_0^2 + \|\bar{y}\|_0^2 + \left(\sigma - \frac{1}{2}\right)\tau^2 \|y_{\bar{x}\bar{t}}\|_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Заключение

Компактно-разностные схемы являются мощным инструментом численного моделирования волновых уравнений, предлагая высокую точность и устойчивость. Трехдиагональная структура матрицы коэффициентов позволяет существенно сократить вычислительные затраты и эффективно решать большие системы уравнений, что делает ее особенно привлекательной для применения в различных областях науки и техники.

Список источников

1. Thomas J.W. Numerical Partial Differential Equations: Finite Difference Methods. Berlin: Springer, 1998. 468 p.
2. Толстых А.И. Компактные разностные схемы и их применение в задачах аэродинамики. М.: Наука, 1990. 230 с.
3. Lele S.K. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution // J. Comp. Phys. 1992. Vol. 103, № 1. P. 16–42.
4. Sun Z.Z. On the compact difference scheme for heat equation with Neuman boundary conditions // Numer. Methods Partial Diff. Eqns. 2009. Vol. 25. P. 1320–1341.
5. Carpenter M.H., Gottlieb D., Abarbanel S. The stability of numerical boundary treatments for compact high-order finite-difference schemes // J. Comp. Phys. 1993. Vol. 108, № 2. P. 272–295.
6. Самарский А.А. Схемы повышенного порядка точности для многомерного уравнения теплопроводности // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1963. Т. 3, № 5. С. 812–840.
7. Gao G.H., Sun Z.Z. A compact finite difference scheme for the fractional subdiffusion equations // J. Comp. Phys. 2011. Vol. 230, № 3. P. 586–595.
8. Бештоков М.Х. Разностная схема повышенного порядка аппроксимации для уравнения Аллера с переменными коэффициентами // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 13–17. EDN: BEULEI. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-13-17>
9. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 656 с.
10. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 415 с.

References

1. Thomas J.W. Numerical partial differential equations: finite difference methods. Berlin: Springer; 1998. 468 p.
2. Tolstykh A.I. Compact difference schemes and their application in problems of aerodynamics. Moscow: Science; 1990. 230 p. (In Russ.).
3. Lele S.K. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution. J. Comp. Phys. 1992;103(1):16-42.
4. Sun Z.Z. On the compact difference scheme for heat equation with Neuman boundary conditions. Numer. Methods Partial Diff. Eqns. 2009;25:1320-1341.

5. Carpenter M.H., Gottlieb D., Abarbanel S. The stability of numerical boundary treatments for compact high-order finite-difference schemes. *J. Comp. Phys.* 1993;108(2):272-295.
6. Samarskii A.A. Schemes of high-order accuracy for the multi-dimensional heat conduction equation. *U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys.* 1963;3(5):1107-1146.
7. Gao G.H., Sun Z.Z. A compact finite difference scheme for the fractional subdiffusion equations. *J. Comp. Phys.* 2011;230(3):586-595.
8. Beshtokov M.Kh. Difference scheme of higher order of approximation for the Hallaire's equation with variable coefficients. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):13-17. (In Russ.). EDN: BEULEI. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-13-17>
9. Samarskii A.A. *Theory of difference schemes*. Moscow: Science; 1983. 656 p. (In Russ.).
10. Samarskii A.A., Gulin A.V. *Stability of difference schemes*. Moscow: Science; 1973. 415 p. (In Russ.).

Информация об авторе

М.Х. Бештоков – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела вычислительных методов ИПМиА КБНЦ РАН.

Information about the author

M.Kh. Beshtokov – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, Department of Numerical Methods, IAMA KBNSC RAS.

*Статья поступила в редакцию 11.04.2025; одобрена после рецензирования 27.04.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 11.04.2025; approved after reviewing 27.04.2025; accepted for publication 10.07.2025.*

Научная статья

УДК 519.2


<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-25-33>

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЦЕН ОПЦИОНОВ В МОДЕЛЯХ С НЕОПРЕДЕЛЁННОЙ ВОЛАТИЛЬНОСТЬЮ С ПОМОЩЬЮ ФОРМУЛ БЕЛЛМАНА

Наталья Викторовна Данилова¹, Екатерина Алексеевна Колесникова² 

^{1, 2} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ ekakoles@sfedu.ru

² nvdanilova@sfedu.ru 

Аннотация. Рассматриваются две модели с неопределённой волатильностью и модель Хестона. Для опциона европейского типа получены уравнения Беллмана для расчёта интервала справедливых цен в случае моделей с неопределённой волатильностью, а также справедливой цены для модели Хестона. Для сравнения используются метод решения краевой задачи, Монте-Карло и метод, основанный на рекуррентных формулах на бинарном дереве. Очевидное преимущество уравнений Беллмана – инвариантность по отношению к способам аппроксимации непрерывных моделей. Показано, что модели с неопределённой волатильностью являются адекватной заменой модели Хестона в случаях, когда необходимо вычислить интервал справедливых цен опциона европейского типа.

Ключевые слова: опцион, модель Хестона, модель Блэка – Шоулза – Мертона, неопределённая волатильность, стохастическая волатильность, уравнение Беллмана, метод Монте-Карло

Для цитирования: Данилова Н.В., Колесникова Е.А. Вычисление цен опционов в моделях с неопределённой волатильностью с помощью формул Беллмана // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 25–33. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-25-33>

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 25-11-00094.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).


Original article

CALCULATION OF OPTION PRICES IN MODELS WITH UNCERTAIN VOLATILITY USING BELLMAN FORMULAS

Natalia V. Danilova¹, Ekaterina A. Kolesnikova² 

^{1, 2} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ ekakoles@sfedu.ru

² nvdanilova@sfedu.ru 

Abstract. Two models with uncertain volatility and the Heston model are considered. For the European type option, Bellman equations are obtained for calculating the range of fair prices in the case of models with uncertain volatility, as well as for calculating the fair price in the case of the Heston model. For comparison, the boundary value problem solution method, the Monte Carlo method and the method based on recurrent formulas on a binary tree are used. An obvious advantage of Bellman equations is their invariance with respect to methods of approximating continuous models. The main conclusion is that models with uncertain volatility are an adequate replacement for the Heston model in cases where it is necessary to calculate the range of fair prices of a European type option.

© Данилова Н.В., Колесникова Е.А., 2025

Keywords: option, Heston model, Black-Scholes-Merton model, uncertain volatility, stochastic volatility, Bellman equation, Monte Carlo method

For citation: Danilova N.V., Kolesnikova E.A. Calculation of Option Prices in Models with Uncertain Volatility Using Bellman Formulas. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2025;(3):25-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-25-33>

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 25-11-00094.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

В 1973 г. Ф. Блэком, М. Шоулзом и Р. Мертоном была получена формула для расчёта справедливой цены стандартного опциона call европейского типа [1]. Под справедливой ценой понимается минимальная величина начального капитала, которая даёт продавцу опциона возможность построения хеджирующей стратегии. Одним из недостатков модели Блэка – Шоулза – Мертона является тот факт, что волатильность постоянна, хотя в реальности предполагаемая волатильность при фиксированном конечном моменте времени T меняется с изменением контрактной цены K , будучи функцией, выпуклой вниз. Этот эффект называется в литературе «улыбкой волатильности» [1] и не объясняется этой стандартной моделью, что привело к разнообразным её обобщениям и усовершенствованиям. Известны такие обобщения модели Блэка – Шоулза – Мертона, как модели диффузии со скачками [1], стохастическими процентными ставками [1], стохастической волатильностью [2–6], неопределённой волатильностью [7–9], разладкой [10–14]. Важный частный случай моделей со стохастической волатильностью – модель Хестона [15]. Известны различные численные методы вычисления цен опционов в модели Хестона: в [16] предложен метод деревьев для вычисления цен американских опционов; в [17] – гибридный метод оценивания цен опционов; в [18] – метод Монте-Карло для вычисления цен американских опционов; в [19] – численный метод вычисления цен барьерных опционов; в [20] – конечно-разностные методы вычисления цен опционов, а также алгоритмы оценивания параметров модели. В [21] приводится алгоритм вычисления цен опционов в модели Хестона с помощью искусственных нейронных сетей; в [22] – численная реализация цен опциона европейского типа с помощью интегральных преобразований. В [7] рассмотрены две модели с неопределённой волатильностью и приведены формулы для расчёта интервала справедливых цен опциона европейского типа.

Цель данной статьи – получение уравнения Беллмана для расчёта интервала справедливых цен опциона европейского типа в случае моделей с неопределённой волатильностью, а также справедливой цены опциона европейского типа для модели Хестона.

Рассмотрим стохастический базис $(\Omega, (F_t)_{t \geq 0}, F, P)$. Пространство элементарных случайных событий Ω – пространство непрерывных на отрезке $[0, T]$ траекторий, фильтрация $(F_t)_{t \geq 0}$ наделена набором стандартных свойств, σ -алгебра $F = F_T = \sigma\left(\bigcup_{t \in [0, T]} F_t\right)$. Основным источником случайности – стандартный винеровский процесс, канонически заданный $W_t(\omega) = \omega(t)$. Более того, будем считать, что данный процесс определяет стохастический базис в следующем смысле: вероятностная мера P – винеровская, фильтрация $F_t = \sigma(W_s, s \in [0, T])$.

Рассмотрим (B, S) -рынок:

$$dS_t = S_t(\mu_t dt + \sigma_t dW_t), \quad dB_t = rB_t dt.$$

Далее будем предполагать, что $\mu_t = r$. Согласно формуле Ито [1], дифференциал дисконтированного процесса стоимости акции имеет вид $d \frac{S_t}{B_t} = \frac{S_t}{B_t} \sigma_t dW_t$. Дисконтированный процесс

является мартингалом при выполнении условия Новикова: $E \exp\left(\frac{1}{2} \int_0^T \sigma_t^2 dt\right) < \infty$.

Введём процесс $R_t = \int_0^t \left(r - \frac{\sigma_s^2}{2}\right) ds + \int_0^t \sigma_s dW_s$. Тогда $S_t = S_0 \exp(R_t)$. Введём функцию $\varphi(x) = f(S_0 \exp(x))$.

Модели в непрерывном времени

Модель Хестона. Предположим, что волатильность – решение стохастического дифференциального уравнения $d\sigma_t = k(\theta - \sigma_t)dt + \nu\sqrt{\sigma_t}d\bar{W}_t$, $k\theta \geq \nu$.

Процессы W и \bar{W} – винеровские с $dW_t d\bar{W}_t = \rho dt$; k, θ, ρ, ν – константы.

Чтобы найти справедливую цену $C^* = \exp(-rT)E\varphi(R_T)$, необходимо вычислить $E\varphi(R_T)$. Введём функцию $v(t, x, y) = E(\varphi(R_T) / R_t = x, \sigma_t = y)$. Тогда $\exp(-rT)v(0, 0, \sigma_0)$ – справедливая цена.

Из формулы Ито следует уравнение

$$-rv + v'_t + v'_x(r - y/2) + v'_y k(\theta - y) + \frac{1}{2} v''_{xx} y + \frac{1}{2} v''_{yy} y^2 + v''_{xy} y \rho = 0$$

с краевым условием $v(T, x, y) = \varphi(x)$.

Первая модель с неопределённой волатильностью. Пусть $\sigma_t \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]$, $0 \leq t \leq T$.

Чтобы оценить верхнюю и нижнюю цены, необходимо решить следующие задачи оптимального управления:

$$\sup_{\sigma_t \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}], 0 \leq t \leq T} E\varphi(R_T), \quad \inf_{\sigma_t \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}], 0 \leq t \leq T} E\varphi(R_T). \quad (1)$$

Верхняя цена – $C^* = \exp(-rT) \sup_{\sigma_t \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}], 0 \leq t \leq T} E\varphi(R_T)$, нижняя цена – $C_* = \exp(-rT) \inf_{\sigma_t \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}], 0 \leq t \leq T} E\varphi(R_T)$.

Введём функции $\bar{v}(t, x) = \sup_{\sigma_s \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}], t \leq s \leq T} E(\varphi(R_T) / R_t = x)$, $\underline{v}(t, x) = \inf_{\sigma_s \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}], t \leq s \leq T} E(\varphi(R_T) / R_t = x)$. То-

гда верхняя цена равна $\exp(-rT)\bar{v}(0, 0)$, нижняя – $\exp(-rT)\underline{v}(0, 0)$. Уравнения Гамильтона – Якоби – Беллмана для функций $\bar{v}(t, x)$ и $\underline{v}(t, x)$ имеют вид

$$\bar{v}'_t + r\bar{v}'_x + \sup_{\sigma \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]} \frac{\sigma^2}{2} (\bar{v}''_{xx} - \bar{v}'_x) = r\bar{v},$$

$$\underline{v}'_t + r\underline{v}'_x + \inf_{\sigma \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]} \frac{\sigma^2}{2} (\underline{v}''_{xx} - \underline{v}'_x) = r\underline{v}.$$

Краевые условия: $\bar{v}(T, x) = \underline{v}(T, x) = \varphi(x)$.

Эти уравнения эквивалентны следующим:

$$\begin{aligned} \bar{v}'_t + (r - A)\bar{v}'_x + A\bar{v}''_{xx} + B|\bar{v}''_{xx} - \bar{v}'_x| &= r\bar{v}, \\ \underline{v}'_t + (r - A)\underline{v}'_x + A\underline{v}''_{xx} - B|\underline{v}''_{xx} - \underline{v}'_x| &= r\underline{v}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$A = \frac{\bar{\sigma}^2 + \underline{\sigma}^2}{4}, \quad B = \frac{\bar{\sigma}^2 - \underline{\sigma}^2}{4}.$$

Краевые условия: $\bar{v}(T, x) = \underline{v}(T, x) = \varphi(x)$.

Уравнение (2) являются уравнениями G -теплопроводности с нелинейными операторами:

$$G_1(v'_x, v''_{xx}) = A(v''_{xx} - v'_x) + B|v''_{xx} - v'_x|, \quad G_2(v'_x, v''_{xx}) = A(v''_{xx} - v'_x) - B|v''_{xx} - v'_x|.$$

Если функция $\varphi(x)$ непрерывна и ограничена, то (2) имеют единственные вязкостные решения [23]. Верификация Перрона вязкостных решений (2) как решений задач стохастического оптимального управления (1) выполняется так же, как в [24].

Вторая модель с неопределённой волатильностью. Пусть $d\sigma_t = \sigma_t \eta_t dt$, $\eta_t \in [\underline{\eta}, \bar{\eta}]$.

Чтобы оценить верхнюю и нижнюю цены, необходимо решить следующие задачи оптимального управления:

$$\sup_{\Delta_0^T} E\varphi(R_T), \inf_{\Delta_0^T} E\varphi(R_T). \quad (3)$$

Множество допустимых траекторий $\Delta_t^2 = \{\eta_t \in [\underline{\eta}, \bar{\eta}], t \in [t_1, t_2]\}$. Введём функции

$$\bar{v}(t, x, y) = \sup_{\Delta_t^T} E(\varphi(R_T) / R_t = x, \sigma_t = y),$$

$$\underline{v}(t, x, y) = \inf_{\Delta_t^T} E(\varphi(R_T) / R_t = x, \sigma_t = y).$$

Тогда верхняя цена – $\exp(-rT)\bar{v}(0,0,\sigma_0)$, нижняя – $\exp(-rT)\underline{v}(0,0,\sigma_0)$. Уравнения Гамильтона – Якоби – Беллмана для функций $\bar{v}(t, x, y)$ и $\underline{v}(t, x, y)$ имеют вид

$$\begin{aligned} \bar{v}'_t + r\bar{v}'_x + \frac{y^2}{2}(\bar{v}''_{xx} - \bar{v}'_x) + Ay\bar{v}'_y + By|\bar{v}'_y| &= r\bar{v}, \\ \underline{v}'_t + r\underline{v}'_x + \frac{y^2}{2}(\underline{v}''_{xx} - \underline{v}'_x) + Ay\underline{v}'_y - By|\underline{v}'_y| &= r\underline{v}, \\ A = \frac{\bar{\eta} + \underline{\eta}}{2}, \quad B = \frac{\bar{\eta} - \underline{\eta}}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Краевые условия: $\bar{v}(T, x, y) = \underline{v}(T, x, y) = \varphi(x)$.

Уравнения (4) являются двумерными уравнениями G -теплопроводности с

$$G_1(y, t, v'_x, v'_y, v''_{xx}) = rv'_x + \frac{y^2}{2}(v''_{xx} - v'_x) + Ayv'_y + By|v'_y|,$$

$$G_2(y, t, v'_x, v'_y, v''_{xx}) = rv'_x + \frac{y^2}{2}(v''_{xx} - v'_x) + Ayv'_y - By|v'_y|.$$

Если функция $\varphi(x)$ непрерывна и ограничена, то (4) имеют единственные вязкостные решения [23]. Верификация Перрона вязкостных решений (4) как решений задач стохастического оптимального управления (3) выполняется так же, как в [24]. В финансовой литературе (4) известны как уравнения Баренблатта [25].

В симметричном случае, когда $\bar{\eta}_t = \alpha, \underline{\eta}_t = -\alpha$, (4) имеют вид

$$\bar{v}'_t + r\bar{v}'_x + \frac{y^2}{2}(\bar{v}''_{xx} - \bar{v}'_x) + \alpha y|\bar{v}'_y| = r\bar{v},$$

$$\underline{v}'_t + r\underline{v}'_x + \frac{y^2}{2}(\underline{v}''_{xx} - \underline{v}'_x) - \alpha y|\underline{v}'_y| = r\underline{v}.$$

Краевые условия: $\bar{v}(T, x, y) = \underline{v}(T, x, y) = \varphi(x)$.

Модели в дискретном времени

Введём дисконтированный процесс $\bar{S} = \frac{S}{B}$ и рассмотрим эквивалентный $(\bar{S}, 1)$ -рынок и финансовое обязательство $\varphi(x) = f(xB_T)$. Разобьём интервал $[0, T]$ на N частей с шагом $h = \frac{T}{N}$.

Модель Хестона. Приведём дискретную модель, аппроксимирующую модель Хестона:

$$\begin{cases} \Delta \bar{S}_n = \bar{S}_{n-1} \sqrt{\sigma_{n-1} h} \varepsilon_n, \\ \Delta \sigma_n = k(\theta - \sigma_{n-1})h + \nu \sqrt{\sigma_{n-1} h} \bar{\varepsilon}_n, \end{cases} \quad (5)$$

$n = 1, \dots, N$.

Последовательности $(\varepsilon_n)_{n=1}^N$ и $(\bar{\varepsilon}_n)_{n=1}^N$ состоят из нормальных случайных величин с $E\varepsilon_n = 0, E\bar{\varepsilon}_n = 0, E(\varepsilon_n)^2 = 1, E(\bar{\varepsilon}_n)^2 = 1, \text{cov}(\varepsilon_n, \bar{\varepsilon}_n) = \rho$.

Бинарная модель, аппроксимирующая (5):

$$\begin{cases} \Delta \bar{S}_n = \bar{S}_{n-1} \sqrt{\sigma_{n-1} h} Y_n, \\ \Delta \sigma_n = \nu \sqrt{\sigma_{n-1} h} \bar{Y}_n, \end{cases} \quad (6)$$

$n = 1, \dots, N$.

Последовательности $(Y_n)_{n=1}^N$ и $(\bar{Y}_n)_{n=1}^N$ состоят из независимых бинарных случайных величин, принимающих значения 1 и -1, вероятности $p_n = P(Y_n = 1) = \frac{1}{2}, \bar{p}_n = P(\bar{Y}_n = 1) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k\sqrt{h}(\theta - \sigma_{n-1})}{\nu\sqrt{\sigma_{n-1}}} \right), \text{cov}(Y_n, \bar{Y}_n) = \rho$.

Чтобы оценить справедливую цену, необходимо вычислить $E\varphi(\bar{S}_N)$. Введём функцию $v^N(n, x, y) = E(\varphi(\bar{S}_N) / \bar{S}_n = x, \sigma_n = y)$, тогда справедливая цена $C = \exp(-rT)v^N(0, S_0, \sigma_0)$.

Справедливая цена опциона может быть вычислена с помощью метода Монте-Карло. Для дискретной аппроксимации (5) надо в каждом эксперименте генерировать случайные величины $\varepsilon_n, \bar{\varepsilon}_n$ согласно следующему правилу: сначала независимые, стандартные нормальные случайные величины, $\delta_n, \bar{\delta}_n$, затем $\varepsilon_n := \delta_n, \bar{\varepsilon}_n := \delta_n \rho + \bar{\delta}_n \sqrt{1 - \rho^2}$. Для бинарной аппроксимации (6) необходимо в каждом эксперименте генерировать случайные величины Y_n, \bar{Y}_n согласно правилу: сначала случайная величина Y_n , которая равна единице с вероятностью p_n ; если $Y_n = 1$, то случайная величина \bar{Y}_n генерируется с вероятностью $P(\bar{Y}_n = 1 / Y_n = 1) = \frac{\rho}{p_n} + \bar{p}_n$; если $Y_n = -1$ – то с вероятностью $P(\bar{Y}_n = 1 / Y_n = -1) = \bar{p}_n - \frac{\rho}{1 - p_n}$.

Справедливая цена может быть вычислена с помощью рекуррентных формул, в которых используется последовательность функций Беллмана $V(n, x, y)$, связанных уравнением Беллмана $V(n-1, x, y) = EV(n, x + x\sqrt{yh}Y_n, y + \nu\sqrt{yh}\bar{Y}_n)$. Применение формулы Тейлора второго порядка существенно их упрощает:

$$\begin{aligned} V(n-1, x, y) &= V(n, x, y) + V'_y(n, x, y)k(\theta - y)h + \frac{1}{2}(V''_{xx}(n, x, y)x^2yh + \\ &+ 2V''_{xy}(n, x, y)x\sqrt{yh}\rho + V''_{yy}(n, x, y)(k^2(\theta - y)^2h^2 + \nu^2yh)). \end{aligned}$$

Окончательно, убирая слагаемые второго порядка малости, получим

$$\begin{aligned} V(n-1, x, y) &= V(n, x, y) + \left(V'_y(n, x, y)k(\theta - y) + \frac{1}{2}(V''_{xx}(n, x, y)x^2y + \right. \\ &+ 2V''_{xy}(n, x, y)x\sqrt{yh}\rho + V''_{yy}(n, x, y)\nu^2y) \Big) h. \end{aligned}$$

Краевое условие $V(N, x, y) = \varphi(x)$.

Справедливая цена $C = \exp(-rT)V(0, S_0, \sigma_0)$.

Замечание. Данные формулы инвариантны по отношению к моделям (5) и (6).

Модели с неопределённой волатильностью. Бинарный аналог первой модели с неопределённой волатильностью будет иметь вид $\Delta \bar{S}_n = \bar{S}_{n-1} \sigma_n \sqrt{h} Y_n$, $\underline{\sigma} \leq \sigma_n \leq \bar{\sigma}$, $Y_n \in \{-1, 1\}$, $p = P(Y_n = 1) = \frac{1}{2}$. Чтобы оценить верхнюю и нижнюю цены, необходимо решить следующие задачи оптимального управления:

$$\sup_{\sigma_1 \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]} E\varphi(\bar{S}_N), \quad \inf_{\sigma_1 \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]} E\varphi(\bar{S}_N). \quad (7)$$

Введём функции $\bar{v}^N(n, x) = \sup_{\sigma_{n+1} \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]} E(\varphi(\bar{S}_N) / \bar{S}_n = x)$, $\underline{v}^N(n, x) = \inf_{\sigma_{n+1} \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]} E(\varphi(\bar{S}_N) / \bar{S}_n = x)$.

Тогда верхняя цена $\bar{C} = \exp(-rT)\bar{v}^N(0, S_0)$, нижняя цена $\underline{C} = \exp(-rT)\underline{v}^N(0, S_0)$.

Задачи (7) могут быть решены с помощью рекуррентных формул:

$$\bar{v}^N(n-1, x) = \frac{1}{2} \sup_{\sigma \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]} \left(\bar{v}^N(n, x(1 + \sigma\sqrt{h})) + \bar{v}^N(n, x(1 - \sigma\sqrt{h})) \right), \quad \bar{v}^N(N, x) = \varphi(x).$$

$$\underline{v}^N(n-1, x) = \frac{1}{2} \inf_{\sigma \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]} \left(\underline{v}^N(n, x(1 + \sigma\sqrt{h})) + \underline{v}^N(n, x(1 - \sigma\sqrt{h})) \right), \quad \underline{v}^N(N, x) = \varphi(x).$$

Заметим, что и в этом случае может быть использована формула Тейлора. Рекуррентные уравнения для верхней цены будут выглядеть так:

$$\bar{V}(n-1, x) = \bar{V}(n, x) + \max_{\underline{\sigma} \leq \sigma \leq \bar{\sigma}} \frac{x^2 \sigma^2 h}{2} \bar{V}_{xx}''(n, x) = \bar{V}(n, x) + \frac{x^2 h}{2} \left((\bar{\sigma}^2 - \underline{\sigma}^2) \bar{V}_{xx}''(n, x) + (\bar{\sigma}^2 + \underline{\sigma}^2) \bar{V}_{xx}''(n, x) \right).$$

Индекс N опущен, чтобы не загромождать выкладки. В частности, если $\underline{\sigma} = 0$, то рекуррентные уравнения для верхней и нижней цены будут иметь вид

$$\bar{V}(n-1, x) = \bar{V}(n, x) + \max_{\underline{\sigma} \leq \sigma \leq \bar{\sigma}} \frac{x^2 \sigma^2 h}{2} \bar{V}_{xx}''(n, x) = \bar{V}(n, x) + \frac{x^2 h \bar{\sigma}^2}{2} \left(\bar{V}_{xx}''(n, x) + \bar{V}_{xx}''(n, x) \right).$$

$$\underline{V}(n-1, x) = \underline{V}(n, x) + \min_{\underline{\sigma} \leq \sigma \leq \bar{\sigma}} \frac{x^2 \sigma^2 h}{2} \underline{V}_{xx}''(n, x) = \underline{V}(n, x) + \frac{x^2 h}{2} \left((\underline{\sigma}^2 - \bar{\sigma}^2) \underline{V}_{xx}''(n, x) + (\underline{\sigma}^2 + \bar{\sigma}^2) \underline{V}_{xx}''(n, x) \right).$$

Справедлива

Теорема 1. Если функция $\varphi(x)$ непрерывна и ограничена, то $\bar{v}(0, 0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{v}^N(0, S_0)$,

$$\underline{v}(0, 0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \underline{v}^N(0, S_0).$$

Доказательство теоремы аналогично доказательству из [26].

Бинарный аналог второй модели с неопределённой волатильностью будет иметь вид $\Delta \bar{S}_n = \bar{S}_{n-1} \sigma_n \sqrt{h} \eta_n$, $\Delta \sigma_n = \sigma_{n-1} h \eta_n$, $\underline{\eta} \leq \eta_n \leq \bar{\eta}$, $Y_n \in \{-1, 1\}$, $p = P(Y_n = 1) = \frac{1}{2}$. Чтобы оценить

верхнюю и нижнюю цены, необходимо решить следующие задачи оптимального управления:

$$\sup_{\eta_1, \dots, \eta_N} E\varphi(\bar{S}_N), \quad \inf_{\eta_1, \dots, \eta_N} E\varphi(\bar{S}_N). \quad (8)$$

Введём функции $\bar{v}^N(n, x, y) = \sup_{\eta_{n+1}, \dots, \eta_N} E(\varphi(\bar{S}_N) / \bar{S}_n = x, \sigma_n = y)$, $\underline{v}^N(n, x, y) = \inf_{\eta_{n+1}, \dots, \eta_N} E(\varphi(\bar{S}_N) / \bar{S}_n = x,$

$\sigma_n = y)$, тогда верхняя цена – $\exp(-rT)\bar{v}^N(0, S_0, \sigma_0)$, нижняя – $\exp(-rT)\underline{v}^N(0, S_0, \sigma_0)$.

Задачи (8) могут быть решены с помощью рекуррентных формул:

$$\bar{v}^N(n-1, x, y) = \sup_{y(1+h\underline{\eta}) \leq \sigma \leq y(1+h\bar{\eta})} \frac{1}{2} \left(\bar{v}^N(n, x(1 + \sigma\sqrt{h}), \sigma) + \right.$$

$$\left. + \bar{v}^N(n, x(1 - \sigma\sqrt{h}), \sigma) \right), \quad \bar{v}^N(N, x, y) = \varphi(x),$$

$$\begin{aligned} \underline{v}^N(n-1, x, y) = & \inf_{y(1+h\eta) \leq \sigma \leq y(1+h\bar{\eta})} \frac{1}{2} \left(\underline{v}^N(n, x(1+x(1+\sigma\sqrt{h})), \sigma) + \right. \\ & \left. + \underline{v}^N(n, x(1+x(1-\sigma\sqrt{h})), \sigma) \right), \quad \underline{v}^N(N, x, y) = \varphi(x). \end{aligned}$$

Рекуррентные уравнения для верхней и нижней цен, полученные с помощью формулы Тейлора, будут иметь вид

$$\begin{aligned} \bar{V}(n-1, x, y) = & \bar{V}(n, x, y) + \bar{V}_{xx}''(n, x, y) \sup_{y(1+h\eta) \leq \sigma \leq y(1+h\bar{\eta})} \frac{x\sigma^2 h}{2} + \\ & + \bar{V}_y'(n, x, y) \sup_{y(1+h\eta) \leq \sigma \leq y(1+h\bar{\eta})} (\sigma - y) + \bar{V}_{yy}''(n, x, y) \sup_{y(1+h\eta) \leq \sigma \leq y(1+h\bar{\eta})} \frac{(\sigma - y)^2}{2}, \\ \underline{V}(n-1, x, y) = & \underline{V}(n, x, y) + \underline{V}_{xx}''(n, x, y) \inf_{y(1+h\eta) \leq \sigma \leq y(1+h\bar{\eta})} \frac{x\sigma^2 h}{2} + \\ & + \underline{V}_y'(n, x, y) \inf_{y(1+h\eta) \leq \sigma \leq y(1+h\bar{\eta})} (\sigma - y) + \underline{V}_{yy}''(n, x, y) \inf_{y(1+h\eta) \leq \sigma \leq y(1+h\bar{\eta})} \frac{(\sigma - y)^2}{2}. \end{aligned}$$

Справедлива

Теорема 2. Если функция $\varphi(x)$ непрерывна и ограничена, то

$$\bar{v}(0, 0, \sigma_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{v}^N(0, S_0, \sigma_0), \quad \underline{v}(0, 0, \sigma_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \underline{v}^N(0, S_0, \sigma_0).$$

Доказательство теоремы аналогично приведённому в [26].

Если параметры базового процесса $S \quad \mu_S(t) = r, \sigma_S(t) = \sigma \equiv \text{const}$, для расчёта справедливой цены $v(0, 0)$, где $v(t, x) = \exp(-r(T-t))E(\varphi(R_T) / R_t = x)$, может быть использована формула Блэка – Шоулза [1]:

$$v(t, x) = S_0 \exp(x) \Phi(d_+(x)) - K \exp(-r(T-t)) \Phi(d_-(x)),$$

$$\text{где } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad d_{\pm}(x) = \frac{\ln\left(\frac{S_0}{K}\right) + x + (T-t)\left(r \pm \frac{\sigma^2}{2}\right)}{\sigma\sqrt{T-t}},$$

в дискретном случае для расчёта справедливой цены $v^N(0, S_0)$ – формула Кокса – Росса – Рубинштейна [1]:

$$v^N(n, S_n) = \frac{(1+rh)^{n-N}}{2^N} \sum_{k=0}^{N-n} C_{N-n}^k f\left(\bar{S}_n (1+\sigma\sqrt{h})^k (1-\sigma\sqrt{h})^{N-n-k} (1+rh)^N\right),$$

где $f(x) = \max(x - K, 0)$.

Заключение

В статье рассматриваются модели с неопределённой и стохастической волатильностью. Для опциона европейского типа предложены методы расчёта справедливых цен, основанные на уравнении Беллмана, решении краевой задачи, а также рекуррентных формулах на бинарном дереве. Показано преимущество использования уравнения Беллмана.

Список источников

1. Ширяев А.Н. Основы стохастической финансовой математики. М.: ФАЗИС, 2004. 512 с. EDN: QQGHFT.
2. Hull J. Options, futures and other derivatives. Prentice Hall, 2012. 432 p.
3. Hull J., White A. The pricing of options on assets with stochastic volatilities // J. of Finance. 1997. Vol. 42, № 2. P. 281–300.
4. Johnson H., Shanno D. Option pricing when the variance is changing // J. of Financial and Quantitative Analysis. 1987. Vol. 22, № 2. P. 143–151.

5. Stein E., Stein J. Stock price distributions with stochastic volatility: an analytic approach // *Reviews of Financial Studies*. 1991. Vol. 4, № 4. P. 727–752.
6. Scott L. Option pricing when the variance changes randomly. Theory, estimation and an application // *J. of Financial and Quantitative Analysis*. 1987. Vol. 22, № 4. P. 419–438.
7. Белявский Г.И., Данилова Н.В. Модели с неопределённой волатильностью // *Вестн. Южн.-Уральского гос. ун-та. Серия: Мат. моделирование и программирование*. 2023. Т. 16, № 3. С. 5–19. <https://doi.org/10.14529/mmp230301>
8. Avellaneda M., Levy A., Paras A. Pricing and hedging derivative securities in markets with uncertain volatilities // *Applied Mathematical Finance*. 1995. № 2. P. 73–88.
9. Peng S. G-Brownian motion and dynamic risk measure under volatility uncertainty // *arXiv: 0711.2834v1*. 2007.
10. Белявский Г.И., Данилова Н.В. Расчёт справедливой цены европейского опциона в модели (B,S)-рынка с барьером, основанной на случайном блуждании // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2015. № 4. С. 25–28. EDN: VAYHVV.
11. Белявский Г.И., Данилова Н.В. Расчёт справедливой цены барьерного опциона в модели (B,S)-рынка с переключением параметров // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2016. № 1. С. 11–16. EDN: VSKTYR.
12. Belyavsky G.I., Danilova N.V., Zemlyakova I.A. Optimal control problems with disorder // *Automation and Remote Control*. 2019. Vol. 80, № 8. P. 1419–1427. <https://doi.org/10.1134/S0005117919080046>
13. Belyavsky G.I., Danilova N.V., Zemlyakova I.A. Optimal control in binary models with the disorder // *Engineering Letters*. 2021. Vol. 29, № 4. P. 1359–1364.
14. Белявский Г.И., Данилова Н.В. Управление в бинарных моделях с разладкой // *Вестн. Южн.-Уральского гос. ун-та. Серия: Мат. моделирование и программирование*. 2022. Т. 15, № 3. С. 67–82. EDN: VPZBHO. <https://doi.org/10.14529/mmp220305>
15. Heston S.L. A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options // *Review of Financial Studies*. 1993. № 6. P. 327–344.
16. Vellekoop M.H., Nieuwenhuis J.W. A tree-based method to price American options in the Heston model // *J. of Computational Finance*. 2009. Vol. 13, № 1. P. 1–21.
17. Briani D., Caramellino L., Zanette A. A hybrid approach for the implementation of the Heston model // *IMA J. of Management Mathematics*. 2017. Vol. 4. P. 467–500. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpv032>
18. Alfonsi A. High order discretization schemes for the CIR process: application to affine term structure and Heston models // *Mathematics of Computation*. 2010. Vol. 79. P. 209–237.
19. Лужецкая П.А., Кудрявцев О.Е. Вычисление цен опционов в моделях со стохастической волатильностью // *Инженерный вестн. Дона*. 2020. № 5. EDN: NZBBRC.
20. Rouah F. The Heston model and its extensions in Matlab and C#. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2013. 411 p.
21. Кудрявцев О.Е., Данилова Н.В. Вычисление цен опционов в модели Хестона с помощью искусственных нейронных сетей // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2024. № 4-1. С. 31–37. EDN: QLSIZH. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-4-1-31-37>
22. Kahl C., Jaeckel P. Not so-complex logarithms in the Heston model // *Wilmott Magazine*. 2005. № 19. P. 94–103.
23. Lin Q. The Tychonoff uniqueness theorem for the G-heat equation 2011 // *arXiv: 1006.5300v2[math.PR]*.
24. Bayraktar E., Sirbu M. Stochastic Perrons method for Hamilton-Jacobi-Bellman equations // *SIAM J. on Control and Optimization*. 2013. Vol. 51, № 6. P. 4274–4294.
25. Meyer G. The Black-Scholes Barenblatt equation for options with uncertain volatility and its application to static hedging // *Int. J. of Theoretical and Applied Finance*. 2006. Vol. 9, № 5. P. 673–703.
26. Rokhlin D.B. Central limit theorem under uncertain linear transformations // *Statistics and Probability Letters*. 2015. Vol. 107. P. 191–198.

References

1. Shiryaev A.N. *Fundamentals of stochastic financial mathematics*. Moscow: Phase; 2004. 512 p. (In Russ.). EDN: QQGHFT.
2. Hull J. *Options, futures and other derivatives*. Prentice Hall, 2012. 432 p.
3. Hull J., White A. The pricing of options on assets with stochastic volatilities. *J. of Finance*. 1997;42(2):281-300.
4. Johnson H., Shanno D. Option pricing when the variance is changing. *J. of Financial and Quantitative Analysis*. 1987;22(2):143-151.
5. Stein E., Stein J. Stock price distributions with stochastic volatility: an analytic approach. *Reviews of Financial Studies*. 1991;4(4):727-752.

6. Scott L. Option pricing when the variance changes randomly. Theory, estimation and an application. *J. of Financial and Quantitative Analysis*. 1987;22(4):419-438.
7. Belyavsky G.I., Danilova N.V. Models with uncertain volatility. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modeling and Programming*. 2023;16(3):5-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/mmp230301>
8. Avellaneda M., Levy A., Paras A. Pricing and hedging derivative securities in markets with uncertain volatilities. *Applied Mathematical Finance*. 1995;(2):73-88.
9. Peng S. G-Brownian motion and dynamic risk measure under volatility uncertainty. *arXiv*: 0711.2834v1. 2007.
10. Belyavsky G.I., Danilova N.V. Calculation of the fair price of the European option in the model of the (B,S)-market with a barrier based on a random walk. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2015;(4):25-28. (In Russ.). EDN: VAYHVV.
11. Belyavsky G.I., Danilova N.V. Calculation of the fair price of a barrier option in the (B,S)-market model with parameter switching. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(1):11-16. (In Russ.). EDN: VSKTYR.
12. Belyavsky G.I., Danilova N.V., Zemlyakova I.A. Optimal control problems with disorder. *Automation and Remote Control*. 2019;80(8):1419-1427. <https://doi.org/10.1134/S0005117919080046>
13. Belyavsky G.I., Danilova N.V., Zemlyakova I.A. Optimal control in binary models with the disorder. *Engineering Letters*. 2021;29(4):1359-1364.
14. Belyavsky G.I., Danilova N.V. Control in binary models with disorder. *Bulletin of the South Ural State University. Mathematical Modeling and Programming*. 2022;15(3):67-82. (In Russ.). EDN: VPZBHO. <https://doi.org/10.14529/mmp220305>
15. Heston S.L. A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options. *Review of Financial Studies*. 1993;(6):327-344.
16. Vellekoop M.H., Nieuwenhuis J.W. A tree-based method to price American options in the Heston model. *J. of Computational Finance*. 2009;13(1):1-21.
17. Briani D., Caramellino L., Zanette A. A hybrid approach for the implementation of the Heston model. *IMA J. of Management Mathematics*. 2017;4:467-500. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpv032>
18. Alfonsi A. High order discretization schemes for the CIR process: application to affine term structure and Heston models. *Mathematics of Computation*. 2010;79:209-237.
19. Luzhetskaya P.A., Kudryavtsev O.E. Calculation of option prices in models with stochastic volatility. *Engineering J. of Don*. 2020;(5). (In Russ.). EDN: NZBBRC.
20. Rouah F. *The Heston model and its extensions in Matlab and C#*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons; 2013. 411 p.
21. Kudryavtsev O.E., Danilova N.V. Pricing options in the Heston model using artificial neural networks *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(4-1):31-37. (In Russ.). EDN: QLSIZH. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-4-1-31-37>
22. Kahl C., Jaeckel P. Not so-complex logarithms in the Heston model. *Wilmott Magazine*. 2005;(19):94-103.
23. Lin Q. The Tychonoff uniqueness theorem for the G-heat equation. *arXiv*: 1006.5300v2[math.PR]. 2011.
24. Bayraktar E., Sirbu M. Stochastic Perrons method for Hamilton-Jacobi-Bellman equations. *SIAM J. on Control and Optimization*. 2013;51(6):4274-4294.
25. Meyer G. The Black-Scholes Barenblatt equation for options with uncertain volatility and its application to static hedging. *Int. J. of Theoretical and Applied Finance*. 2006;9(5):673-703.
26. Rokhlin D.B. Central limit theorem under uncertain linear transformations. *Statistics and Probability Letters*. 2015;107:191-198.

Информация об авторах

Н.В. Данилова – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры методов оптимизации и машинного обучения Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.
Е.А. Колесникова – студент кафедры методов оптимизации и машинного обучения Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

Information about the authors

N.V. Danilova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Optimization Methods and Machine Learning, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.
E.A. Kolesnikova – Student of the Department of Optimization Methods and Machine Learning, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.

Статья поступила в редакцию 12.05.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 12.05.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 10.07.2025.

Научная статья
УДК 534.2; 535.4
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-34-43>

МЕТОД ГРАНИЧНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ В КОРОТКОВОЛНОВОМ РАССЕЙНИИ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕРЕГУЛЯРНОСТЬЮ

Межлум Альбертович Сумбатян^{1✉}, *Ольга Геннадьевна Максимова*²,
*Татьяна Олеговна Петрова*³

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

^{1, 2, 3} Череповецкий государственный университет, Череповец, Россия

¹ masumbatyan@sfedu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3653-4867>

² og62@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0083-8228>

³ topetrova@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6004-0608>

Аннотация. Волновые задачи в акустике и оптике имеют различную физическую природу, но описываются практически одинаковыми определяющими уравнениями. По этой причине методы решения в этих двух областях развивались параллельно и взаимосвязано. В данной работе исследуется задача рассеяния падающей волны на рельефной граничной поверхности периодической геометрии. Для простоты используется скалярное волновое уравнение из линейной акустики, но оно рассматривается в частотном диапазоне, более характерном для задач оптики, когда длина волны на один-два порядка меньше характерного размера зерен рельефа, т.е. в коротковолновом диапазоне. Задача имеет большое практическое значение, так как методы облучения поверхностей потоками световых волн (включая лазерные) эффективно работают для неразрушающего контроля качества поверхностей изделий из металлов, композитов, полимеров и других материалов. Задача в гармоническом по времени режиме и в двумерном приближении сводится к граничному интегральному уравнению, после его дискретизации – к системе линейных алгебраических уравнений. Рассмотрен ряд примеров рассеяния на двух видах граничных контуров, с тремя различными значениями амплитуды возвышения рельефных зерен. По результатам расчетов сделаны важные теоретические и практические выводы.

Ключевые слова: рассеяние волн, рельефная граница, граничное интегральное уравнение, численный метод, диаграмма рассеяния

Для цитирования: Сумбатян М.А., Максимова О.Г., Петрова Т.О. Метод граничного интегрального уравнения в коротковолновом рассеянии волн на поверхности с периодической нерегулярностью // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 34–43. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-34-43>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

BOUNDARY INTEGRAL EQUATION METHOD IN SHORT-WAVE DIFFRACTION BY SURFACES WITH PERIODIC IRREGULARITY

Mezhlum A. Sumbatyan^{1✉}, *Olga G. Maksimova*², *Tatyana O. Petrova*³

¹ Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

^{1, 2, 3} Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

¹ masumbatyan@sfedu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3653-4867>

² og62@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0083-8228>

³ topetrova@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6004-0608>

© Сумбатян М.А., Максимова О.Г., Петрова Т.О., 2025

Abstract. Wave problems in acoustics and optics, although having different physical nature, are nevertheless described by practically identical governing equations. For this reason, the methods of solution in these two fields were developed in parallel and with close interconnection. In this paper, the problem of scattering of an incident wave by a relief boundary surface of periodic geometry is investigated. For simplicity, a scalar wave equation from linear acoustics is used, but it is considered in the frequency range more typical for optics problems, when the wavelength is one or two orders of magnitude smaller than the characteristic size of relief grains, i.e. in the short-wave range. The problem is of great practical importance, since the methods of irradiating surfaces with beams of light waves (including lasers) effectively work for non-destructive quality control of surfaces of products made of metals, composites, polymers and other materials. The problem in the harmonic time mode and in the two-dimensional approximation is reduced to a boundary integral equation, which after discretization is reduced to a system of linear algebraic equations. A number of examples of scattering by two types of boundary contours, with three different values of the amplitude of the elevation of relief grains, are considered. Important theoretical and practical conclusions are made based on the calculation results.

Keywords: diffraction of waves, relief boundary, boundary integral equation, numerical technique, diagram of scattering

For citation: Sumbatyan M.A., Maksimova O.G., Petrova T.O. Boundary Integral Equation Method in Short-Wave Diffraction by Surfaces with Periodic Irregularity. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):34-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-34-43>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Математически волновые процессы для акустических и электромагнитных сред по своим определяющим уравнениям практически идентичны, хотя и имеют различную физическую природу. Поэтому развитие методов решения волновых задач в акустике и оптике шло параллельно. Появление новых методов исследования в одной из этих областей практически сразу же переносилось на другую.

Первые подходы к задачам отражения и рассеяния волн на неровных границах основывались на приближенных методах. Линейные методы малых возмущений, приближения Борна и Рытова в оптике применимы для шероховатостей малой амплитуды [1], что эффективно в длинноволновой области частот. В [2] предложено приближение касательной плоскости (ПКП), которое перекликается с физической теорией Кирхгофа [3, 4] и эффективно для коротких волн. Далее возникли теории, объединяющие неровности обоих типов, так называемые двухмасштабные модели [5], а также была обобщена теория ПКП [6]. Классические результаты на заре развития этих теорий в применении к рассеянию на нерегулярных шероховатых поверхностях отражены в монографиях [7–9]. Альтернативный подход основан на разложении Рэлея в виде бесконечного ряда в области выше шероховатостей. Известно, что разложение Рэлея может быть аналитически продолжено из той области, где оно регулярно, и в некоторых случаях – вплоть до границы. Однако вопрос, для каких границ это возможно, остается открытым. Обзор методов этого типа можно найти в [10].

При построении решения задачи рассеяния основное препятствие в коротковолновой области состоит в том, что простые модели эффективны, если амплитуда шероховатостей столь мала, что между соседними горбиками рельефа не могут происходить переотражения волн. Для преодоления этой сложности были предложены асимптотические методы, учитывающие однократные отражения и многократные переотражения [4, 11].

Однако самым универсальным методом решения задач рассеяния является метод граничных интегральных уравнений (ГИУ) [12], который в дискретном виде иногда называют методом граничных элементов (МГЭ) [13, 14]. Он универсален, поскольку абсолютно безразличен как к геометрии области, так и к режиму колебаний (низкие, высокие, средние частоты). Этот метод широко распространен в акустике, механике и оптике. Многие задачи, важные в теоретическом и практическом аспектах, решены именно этим методом [4, 15, 16].

В настоящей работе применяется метод ГИУ к периодическим шероховатым поверхностям. Данная проблема имеет большое практическое значение в оптике, так как метод облучения световыми волнами широко используется для оценки качества поверхностей изделий из различных материалов (металлы, композиты, полимеры и др.) [17]. В акустике эта тематика актуальна в проблеме рассеяния звуковых волн диффузорами различной геометрии для улучшения акустических свойств помещений [15]. При этом сравниваются построенные решения в различных областях изменения физических параметров задачи.

Формулировка задачи и ее сведение к ГИУ

Рассмотрим двумерный (2d) волновой процесс, гармонический во времени, в котором генерируемая точечным источником $x_0 = (x_1^0, x_2^0)$ волна рассеивается на периодической шероховатой поверхности (рис. 1). Постановка данной задачи возможна как для акустических, так и для световых волн. В первом случае задача является скалярной для акустического давления, во втором случае имеем два волновых уравнения для двух скалярных функций – в зависимости от поляризации волны.

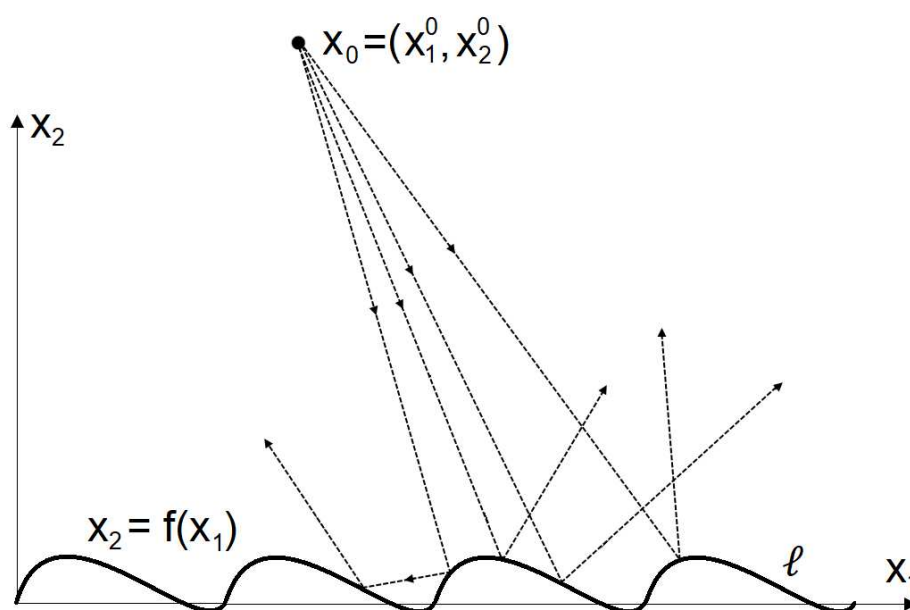


Рис. 1. Коротковолновое рассеяние гармонической волны от точечного источника $x_0 = (x_1^0, x_2^0)$ на периодической горизонтальной поверхности / Fig. 1. Short-wave diffraction of a harmonic wave, from a point source $x_0 = (x_1^0, x_2^0)$, by a periodic horizontal surface

Для определенности ограничимся скалярным случаем, который мы будем адаптировать для оптического режима длин волн (длина волны – сотни нанометров, а амплитуда и период рельефа шероховатости – десятые или даже сотые доли миллиметров). При этом обычно длина волны $\lambda = 2\pi/k$ в 20–50 раз меньше, чем характерный размер зерна. То есть в световом диапазоне длин волн действительно имеем коротковолновый режим.

Если границу области в первом приближении считать абсолютно твердой, то в скалярной модели определяющим уравнением является уравнение Гельмгольца с однородным граничным условием Неймана:

$$p + k^2 p = 0, \quad \left(\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right), \quad \frac{\partial p}{\partial n} \Big|_l = 0, \quad (1)$$

где p – волновое давление, $k = \omega/c$ – волновое число; c – скорость звука; l – граничный контур. Зависимость от времени задается множителем $e^{-i\omega t}$, где ω – угловая частота колебаний. Любая точка в двумерной декартовой системе координат определяется двумя декартовыми координатами: $x = (x_1, x_2)$, $y = (y_1, y_2)$ и т.д.

Если волновое число не совпадает ни с одним значением из некоторого счетного набора сингулярных чисел [12], то решение граничной задачи (1) эквивалентно следующему ГИУ:

$$\frac{p(x)}{2} - \int_l \frac{\partial G(y,x)}{\partial n_y} p(y) dl_y = p_0(x), \quad x \in l, \quad (2)$$

$$G(y, x) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr), \quad r = |y - x| = [(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2]^{1/2},$$

где $H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля первого рода нулевого порядка [18]. При этом решение краевой задачи (1) дается в виде

$$p^{sc}(x) = \int_l \frac{\partial G(y,x)}{\partial n_y} p(y) dl_y, \quad x \notin l. \quad (3)$$

Граничный контур l предполагается гладким, а единичная нормаль \mathbf{n}_y к нему в точке $y \in l$ направлена внутрь физической среды, которая в нашем случае находится сверху от граничной кривой; dl_y – элементарный элемент дуги l в граничной точке $y \in l$. Также заметим, что правая часть $p_0(x)$ в ГИУ (2) определяется волной, генерируемой точечным источником $x_0 = (x_1^0, x_2^0)$. С точностью до несущественного множителя

$$p_0(x) = H_0^{(1)}(kr_0), \quad r_0 = |x - x_0| = [(x_1 - x_1^0)^2 + (x_2 - x_2^0)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(3) $p(x)$ – полное волновое давление, т.е. сумма величины волнового поля $p_0(x)$ и рассеянной составляющей давления $p^{sc}(x)$: $p = p_0 + p^{sc}$.

Перепишем уравнение (2) в более явном виде

$$\frac{p(x)}{2} + \int_l K(y, x) p(y) dl_y = F(x), \quad x \in l, \quad (5)$$

$$K(y, x) = \frac{ik}{4} H_1^{(1)}(kr) \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y)}{r}, \quad F(x) = p_0(x), \quad \mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{x}.$$

В (5) учтены соотношения:

$$\frac{\partial G}{\partial n_y} = \frac{\partial G}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial n_y}, \quad \frac{\partial G}{\partial r} = -\frac{ik}{4} H_1^{(1)}(kr), \quad \frac{\partial r}{\partial n_y} = \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_y)}{r}. \quad (6)$$

В условиях, когда граничный контур определяется однозначной функцией $x_2 = f(x_1)$ (рис. 1), эти соотношения можно конкретизировать. В частности, компоненты единичной нормали и элементарная длина дуги находятся по формулам

$$\mathbf{n}_y(y_1) = \frac{\{-f'(y_1), 1\}}{\sqrt{1+[f'(y_1)]^2}}, \quad dl_y = \sqrt{1+[f'(y_1)]^2} dy_1. \quad (7)$$

Тогда ГИУ (5) можно переписать в виде

$$\frac{p(x_1)}{2} + \int_0^L M(y_1, x_1) p(y_1) dy_1 = F(x_1), \quad 0 \leq x_1 \leq L, \quad (8)$$

$$M(y_1, x_1) = \frac{ik}{4r} H_1^{(1)}(kr) [(x_1 - y_1) f'(y_1) + f(y_1) - f(x_1)],$$

$$r = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + [f(y_1) - f(x_1)]^2},$$

где выбранная часть граничного контура соответствует отрезку длиной L вдоль горизонтальной оси. Таким образом, ГИУ (5) свелось к обычному интегральному уравнению Фредгольма 2-го рода на отрезке. Можно доказать, что для гладкого граничного контура функция $M(y_1, x_1)$ непрерывна и при $y_1 \rightarrow x_1$, ($r \rightarrow 0$) в (8) имеет конечный предел, зависящий от кривизны контура в данной точке [12]. Это подтверждает фредгольмовость интегрального оператора (8).

Дискретизация ГИУ (2) и численный алгоритм

При численной реализации предполагается, что интегрирование по контуру l можно ограничить достаточно большим конечным числом периодов. Такой подход будет давать корректное приближение к значению рассеянного поля в произвольной точке наблюдения x в формуле (3). Во всех дальнейших примерах рассматривались два вида периодической рассеивающей граничной поверхности с длиной периода $P = 0,2$ мм; $L = 8P = 1,6$ мм: $0 < x_1 < 8P$ (рис. 2). Амплитуда A рельефа принимала одно из следующих трех значений: $A = 10^{-4}$, $10^{-2,5}$, 10^{-1} мм. На рис. 2 показан максимальный случай $A = 10^{-1}$ мм. Первый из трех случаев соответствует

амплитуде рельефа 100 нм, что на порядок меньше, чем длина волны дневного света. Расчеты в этом намеренно искусственном режиме производились лишь для тестирования алгоритма. Источник волны всегда брался в дальней зоне, так что падающую волну можно считать плоской. При этом изучались два направления падения – нормальное (сверху ортогонально горизонтальной оси) и под углом 45°: слева направо и сверху вниз – по отношению к горизонтальной оси.

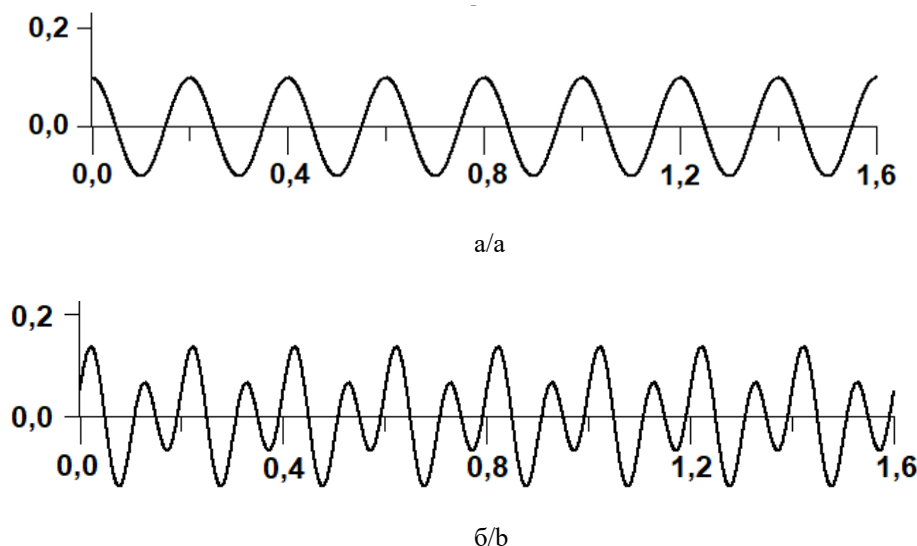


Рис. 2. Два вида граничной поверхности рассеяния: $A = 10^{-1}$ мм, $P = 0,2$ мм, $L = 8P$:
 1-й: $a - x_2 = A \cos(2\pi x_1/P)$; 2-й: $b - x_2 = A \left[\frac{1}{2} \cos(2\pi x_1/P) + 2 \sin(4\pi x_1/P) \right]$ / Fig. 2. Two types
 of the boundary scattering surface: $A = 10^{-1}$ mm, $P = 0.2$ mm, $L = 8P$: 1st: $a - x_2 = A \cos(2\pi x_1/P)$;
 2nd: $b - x_2 = A \left[\frac{1}{2} \cos(2\pi x_1/P) + 2 \sin(4\pi x_1/P) \right]$

Если рассеяние по формуле (3) также брать в дальней зоне и нормировать его по углу наблюдения $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ на направление, соответствующее зеркальному отражению, то в случае нормального падения должно получаться значение, близкое к единице на нулевом угле рассеяния, а в наклонном падении – близкое к единице на угле 45°.

Рисунок 3 для границы 1-го вида с искусственно пологим рельефом ($A = 10^{-4}$ мм) подтверждает корректность расчетов, так как в обоих случаях получается почти дельтаобразная диаграмма рассеяния с резким единичным максимумом именно на этих направлениях зеркального отражения. Это говорит о корректном выборе параметров расчета.

Более детально численный расчет состоит в следующем. Разобьем отрезок $0 \leq x_1 \leq L$ в (8) на N малых интервалов одинаковой длины $h = L/N$. Выберем узлы сетки в центре малых интервалов: $x_{1m} = (m - 1/2)h$, ($m = 1, \dots, N$). Положим в (8) $x = x_{1m}$ и представим интеграл (8) как сумму интегралов по малым отрезкам, считая на каждом из них функцию под интегралом почти постоянной:

$$\int_0^L M(y_1, x_{1m}) p(y_1) dy_1 \approx \sum_{j=1}^N h M(x_{1j}, x_{1m}) p(x_{1j}) = \sum_{j=1}^N b_{mj} p_j. \quad (9)$$

С учетом квадратурной формулы (9), ГИУ (8) сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (δ_{mj} – символ Кронекера):

$$\mathbf{M}\mathbf{P} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{M} = [a_{mj}], \quad a_{mj} = \frac{\delta_{mj}}{2} + (1 - \delta_{mj})b_{mj}, \quad \mathbf{P} = [p_j], \quad \mathbf{F} = [F(y_m)]. \quad (10)$$

Матрица СЛАУ (10) записана так, что для диагональных членов (при $j = m$) в первом приближении достаточно оставить в (8) лишь внеинтегральный член, поскольку элементы b_{mj} содержат множитель h , что является бесконечно малой величиной по сравнению с $1/2$.

Входные данные для всех расчетов: $\lambda = P/20$; $h = \lambda/20$. В итоге размерность сетки равна $N = 8(P/h) = 3200$, P – период решетки. Этому же значению равна и размерность СЛАУ (10). Для решения такой системы вполне подходит метод исключения Гаусса.

Рассеянное поле в дальней зоне для рассматриваемых контуров легко выписать явно. Оно получается практически так же, как формула (8) из (5). В итоге приходим к выражению

$$p^{sc}(X_1, X_2) \sim \frac{ik}{4R} \int_0^L H_1^{(1)}(kr) [(X_1 - y_1)f'(y_1) + f(y_1) - X_2] p(y_1) dy_1, \quad (11)$$

$$r = \sqrt{(y_1 - X_1)^2 + [f(y_1) - X_2]^2},$$

где точка наблюдения рассеянной волны:

$$X = (X_1, X_2) = (R \sin \beta, R \cos \beta), \quad (0 \leq \beta \leq 90^\circ), \quad R \rightarrow \infty \quad (12)$$

находится в дальней зоне. На практике в формуле (11) $R = 300 \text{ мм} = 30 \text{ см}$, хотя можно было бы взять и явную асимптотику функции Ханкеля для большого аргумента. Графики при этом не изменяются.

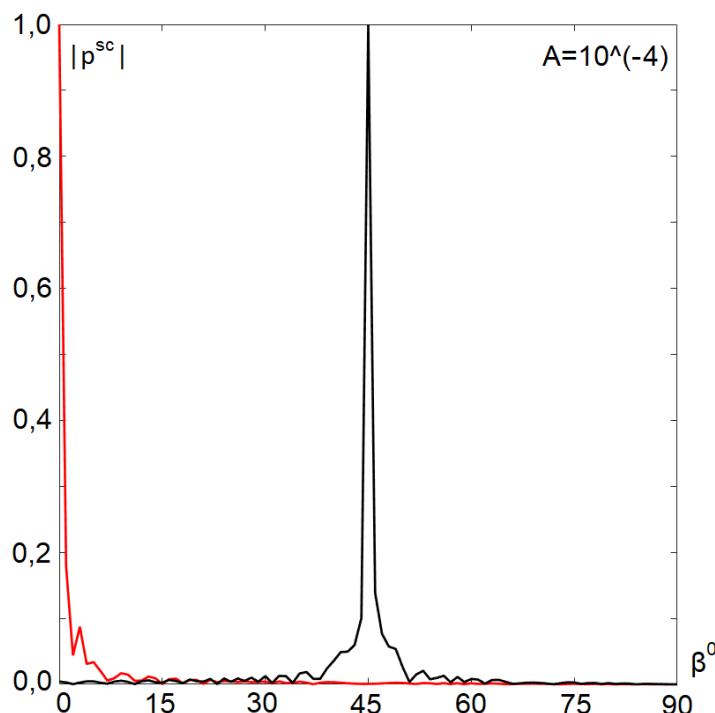


Рис. 3. Нормированная диаграмма рассеяния на поверхности 1-го вида, $A = 10^{-4}$ мм: красный цвет – нормальное падение, черный – падение под углом 45° / Fig. 3. Normalized diagram of scattering by 1st kind surface, $A = 10^{-4}$ mm: red color - normal incidence, black color - incidence at 45°

На рис. 4 показаны диаграммы рассеяния для нормального и наклонного падения при среднем значении амплитуды рельефа $A = 10^{-2,5}$ мм. Очевидно, что по сравнению с рис. 3 форма диаграммы заметно отличается от дельтаобразной, хотя доминирование рассеяния в направлении зеркального отражения все еще сохраняется.

На рис. 5 аналогичные диаграммы показаны для максимальной амплитуды рельефа $A = 10^{-1}$ мм, соответственно, для нормального и наклонного падения. Здесь направление зеркального рассеяния становится еще менее доминирующим, чем в случае рис. 4.

Переходя к граничному контуру 2-го вида, отметим (рис. 2), что он представляет собой более нерегулярную рельефную поверхность. Это приводит к довольно интересным результатам расчетов. Случай предельно малой амплитуды $A = 10^{-4}$ мм на графиках не представлен, так как в расчетах он по-прежнему дает практически дельтаобразную диаграмму рассеяния как для нормального, так и для наклонного направления падающей волны (ср. с рис. 3).

Случай средней амплитуды рельефа $A = 10^{-2,5}$ мм (рис. 6) в сравнении с рис. 4 (красная кривая) для 1-го типа граничного контура показывает, что усиление стохастичности рельефа приводит к заметному усилению рассеяния вне направления зеркального отражения в случае нормального падения (рис. 6а); черная кривая показывает, что в случае наклонного падения (рис. 6б) данное свойство лишь усиливается.

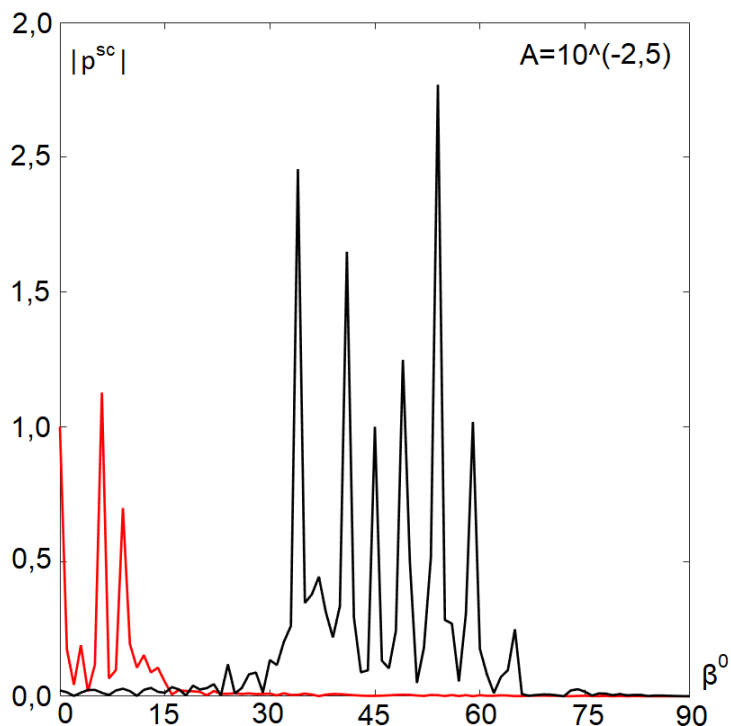


Рис. 4. Нормированная диаграмма рассеяния на поверхности 1-го вида, $A = 10^{-2,5}$ мм: красный цвет – нормальное падение, черный цвет – падение под углом 45° / Fig. 4. Normalized diagram of scattering by 1st kind surface, $A = 10^{-2,5}$ mm: red color - normal incidence, black color - incidence at 45°

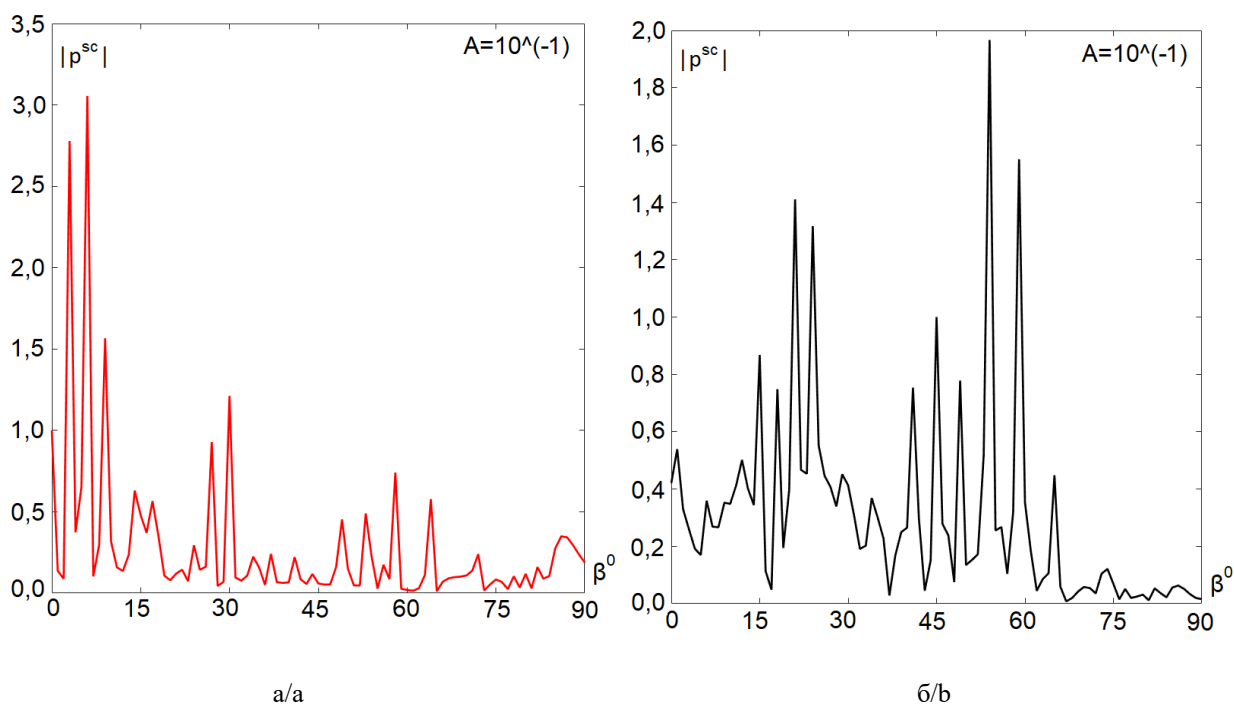


Рис. 5. Нормированная диаграмма рассеяния на поверхности 1-го вида, $A = 10^{-1}$ мм. Нормальное падение – а; наклонное падение – б / Fig. 5. Normalized diagram of scattering by 1st kind surface, $A = 10^{-1}$ mm: normal incidence - a; oblique incidence - b

Любопытно, что дальнейшее увеличение амплитуды колебаний граничной линии рельефа приводит к неоднозначным последствиям. Так, сравнение рис. 7а и рис. 6а показывает, что при

нормальном падении плоской волны возможно возвращение к диаграмме рассеяния, более сконцентрированной в направлении зеркального отражения. В то же время сравнение рис. 7б и рис. 6б показывает, что при наклонном падении волны увеличение размеров зерен рельефа может приводить к большей стохастичности в распределении рассеянной энергии по полярному углу.

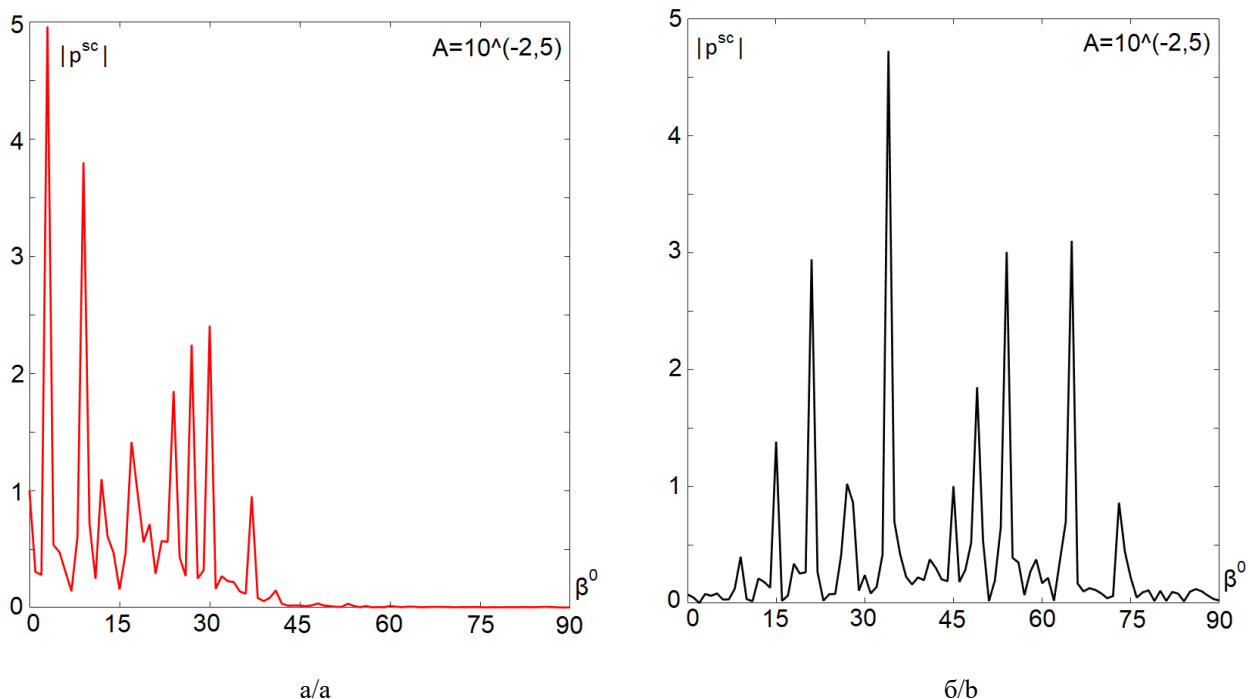


Рис. 6. Нормированная диаграмма рассеяния на поверхности 2-го вида, $A = 10^{-2,5}$ мм: нормальное падение – а; наклонное падение – б / Fig. 6. Normalized diagram of scattering by 2nd kind surface: $A = 10^{-2,5}$ mm: normal incidence - a; oblique incidence - b

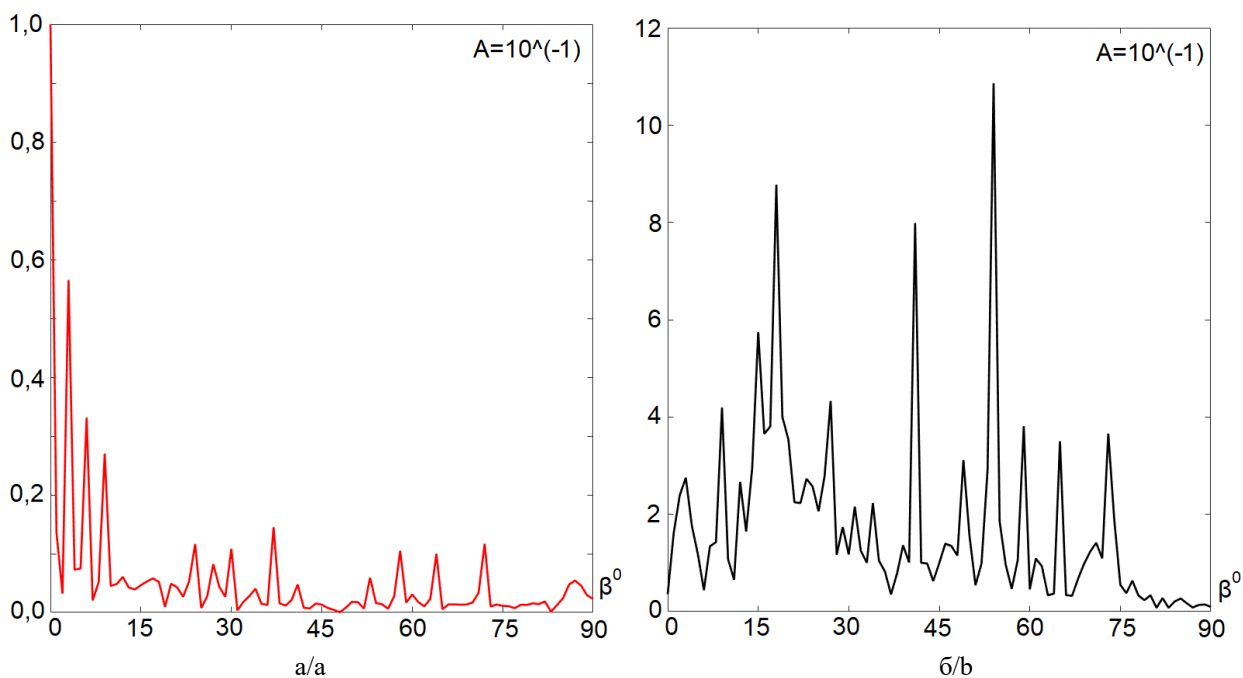


Рис. 7. Нормированная диаграмма рассеяния на поверхности 2-го вида, $A = 10^{-1}$ мм: нормальное падение – а; наклонное падение – б / Fig. 7. Normalized diagram of scattering by 2nd kind surface, $A = 10^{-1}$ mm: normal incidence - a; oblique incidence - b

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Метод, предложенный для решения проблемы рассеяния волн на периодических границах сложной конфигурации, разработан для скалярной модели волнового уравнения в оптическом диапазоне параметров, т.е. в коротковолновой области. Поскольку эффективность метода универсальна по отношению как к геометрии границы, так и к частотному диапазону, в рассматриваемой проблеме он представляет собой надежный метод расчета, точность которого тестируется на примере со слабой неровностью рельефа, где он устойчиво выдает диаграммы рассеяния, физически соответствующие зеркальным отражениям. В более сложных случаях он приводит к устойчивым вычислениям с важными качественными результатами.

2. Нерегулярные диаграммы рассеяния подтверждают тот факт, что рассеяние волн на зернах рельефной структуры границы представляет собой сложный волновой процесс. В лучевом приближении коротких волн его можно интерпретировать как множественные переотражения на гребнях рельефа (рис. 1). Отсюда следует, что ни одна приближенная теория, в которой многократные переотражения не включены как ее неотъемлемая часть, не даст корректной диаграммы рассеяния.

3. Расчеты диаграмм рассеяния и их сравнение для рельефов мелкой и крупной фактуры (малая и большая амплитуда рельефной поверхности) показывают, что с увеличением размера зерен и ростом стохастичности в их геометрии диаграмма рассеяния становится все более стохастической, совсем не похожей на зеркальное или почти зеркальное отражение от почти плоской границы. Детальное изучение этих закономерностей открывает реальный путь к решению обратной задачи рассеяния для таких границ – определению формы границы по диаграмме рассеяния в дальней зоне.

Список источников

1. Schatzberg A., Devaney A.J. Rough surface inverse scattering within the Rytov approximation // J. of the Optical Society of America. A. 1993. Vol. 10, № 5. P. 942–950.
2. Бреховских Л.М. Дифракция звуковых волн на неровной поверхности // Докл. АН СССР. 1951. Т. 79, № 4. С. 585–588.
3. Хенл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции. М.: Мир, 1964. 428 с.
4. Сумбатян М.А., Скалия А. Основы теории дифракции с приложениями в механике и акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 328 с.
5. Курьянов Б.Ф. Рассеяние звука на шероховатой поверхности с двумя типами неровностей // Акуст. журн. 1962. Т. 8, № 3. С. 325–333.
6. Воронович А.Г. Приближение касательной плоскости и некоторые обобщения этого приближения // Акуст. журн. 2007. Т. 53, № 3. С. 346–352.
7. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 428 с.
8. Ogilvy J.A. Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1991. 277 p.
9. Beckmann P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. London: Pergamon Press, 1987. 512 p.
10. Chandezon J., Plumey J.-P. New approach of diffraction of electromagnetic waves by a rough surface. 2015. URL: <https://hal.science/hal-01257932/> (дата обращения: 13.04.2025).
11. Sumbatyan M.A., Boyev N.V. High-frequency diffraction by nonconvex obstacles // J. of the Acoustical Society of America. 1994. Vol. 95, № 5. P. 2346–2353.
12. Колтон Д., Кресс Р. Методы интегральных уравнений в теории рассеяния. М.: Мир, 1987. 312 с.
13. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Методы граничных элементов в прикладных науках. М.: Мир, 1984. 496 с.
14. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987. 526 с.
15. Cox T.J., D'Antonio P. Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2009. 476 p.
16. Saillard M., Maistre D. Scattering from metallic and dielectric rough surfaces // J. of the Optical Society of America. A. 1990. Vol. 7, № 6. P. 982–990.
17. Lu X., Gross H. Efficient simulation of surface scattering in symmetry-free optical systems // Optics Express. 2020. Vol. 28, iss. 26. P. 39368–39386. <https://doi.org/10.1364/OE.411028>
18. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 830 с.

References

1. Schatzberg A., Devaney A.J. Rough surface inverse scattering within the Rytov approximation. *J. of the Optical Society of America. A.* 1993;10(5):942-950.
2. Brekhovskikh L.M. Diffraction of sound waves by uneven surface. *Reports of the USSR Academy of Sciences.* 1951;79(4):585-588. (In Russ.).
3. Honl H., Maue A, Vestpfal K. *Theory of diffraction.* Moscow: World; 1964. 428 p. (In Russ.).
4. Sumbatyan M.A., Scalia A. *Foundations of diffraction theory with applications to mechanics and acoustics.* Moscow: Physics and Mathematics Publishing House; 2013. 328 p. (In Russ.).
5. Kuryanov B.F. Scattering of sound by a rough surface with two types of unevenness. *Acoustic J.* 1962;8(3):325-333. (In Russ.).
6. Voronovich A.G. Approximation of tangent plane and some generalization of this approximation. *Acoustic J.* 2007;53(3):346-352. (In Russ.).
7. Bass F.G., Fuks I.M. *Scattering of waves by a statistically uneven surface.* Moscow: Science; 1972. 428 p. (In Russ.).
8. Ogilvy J.A. *Theory of wave scattering from random rough surfaces.* Boca Raton, Florida: CRC Press; 1991. 277 p.
9. Beckmann P., Spizzichino A. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces.* London: Pergamon Press; 1987. 512 p.
10. Chandezon J., Plumey J.-P. *New approach of diffraction of electromagnetic waves by a rough surface.* 2015. Available from: <https://hal.science/hal-01257932/> [Accessed 13th April 2025].
11. Sumbatyan M.A., Boyev N.V. High-frequency diffraction by nonconvex obstacles. *J. of the Acoustical Society of America.* 1994;95(5):2346-2353.
12. Colton D., Kress R. *Methods of integral equations in the scattering theory.* Moscow: World; 1987. 312 p. (In Russ.).
13. Banerjee P., Butterfield R. *Boundary element methods in engineering science.* Moscow: World; 1984. 496 p. (In Russ.).
14. Brebbia C., Telles J., Wrobel L. *Boundary element techniques.* Moscow: World; 1987. 526 p. (In Russ.).
15. Cox T.J., D'Antonio P. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application.* 2nd ed. London: Taylor & Francis; 2009. 476 p.
16. Saillard M., Maistre D. Scattering from metallic and dielectric rough surfaces. *J. of the Optical Society of America. A.* 1990;7(6):982-990.
17. Lu X., Gross H. Efficient simulation of surface scattering in symmetry-free optical systems. *Optics Express.* 2020;28(26):39368-39386. <https://doi.org/10.1364/OE.411028>
18. Abramowitz M., Stegun I. *Handbook of mathematical functions.* Moscow: Science; 1979. 830 p. (In Russ.).

Информация об авторах

М.А. Сумбатян – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и компьютерной гидроаэродинамики Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ; ведущий научный сотрудник ЧГУ.

О.Г. Максимова – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории математического и компьютерного моделирования наноструктур ЧГУ.

Т.О. Петрова – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры киберфизических систем Института информационных технологий ЧГУ.

Information about the authors

M.A. Sumbatyan – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU; Leading Researcher, ChSU.

O.G. Maksimova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Mathematical and Computer Modeling of Nanostructures, ChSU.

T.O. Petrova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Cyber-Physical Systems, Institute of Information Technologies, ChSU.

Статья поступила в редакцию 06.05.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 06.05.2025; approved after reviewing 05.06.2025; accepted for publication 10.07.2025.

Научная статья

УДК 539.3

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-44-54>

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ПОРОУПРУГОГО ЦИЛИНДРА КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ НА ВИНКЛЕРОВСКОМ ОСНОВАНИИ

Михаил Иванович Чебаков^{1✉}, Елена Михайловна Колосова²

^{1, 2} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ michebakov@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-2075-1760>

² ekolossova@srfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0254-8160>

Аннотация. На основе уравнений теории пороупругих тел Ковина – Нунзиато рассматривается осесимметричная контактная задача о взаимодействии жесткого штампа с пороупругим цилиндром конечных размеров, лежащим на основании Винклера. Предполагается, что основание штампа имеет плоскую форму и форму параболоида вращения, в зоне контакта отсутствует трение. Цилиндр опирается на винклеровское основание, а на боковой поверхности цилиндра отсутствуют нормальные перемещения и касательные напряжения. Штмп перемещается вертикально на определенную величину с помощью заданной силы. Поставленная задача на основе представления неизвестных перемещений в цилиндре и функции, описывающей изменение объемной доли пор, в виде рядов по функциям Бесселя сводится относительно функции распределения контактных напряжений под штампом к интегральному уравнению первого рода, трансформанта ядра которого приводится в явном виде. Для решения интегрального уравнения используется метод коллокаций, который позволяет находить контактные напряжения и зависимость величины приложенной силы от перемещения штампа. Проведен сравнительный анализ исследуемых величин для различных значений параметров винклеровского основания, пористости цилиндра и его геометрических параметров.

Ключевые слова: контактная задача, пористые материалы, винклеровское основание, пороупругость, модель Ковина – Нунзиато, осесимметричная задача, цилиндр, метод коллокаций, индентирование

Для цитирования: Чебаков М.И., Колосова Е.М. Контактная задача для пороупругого цилиндра конечных размеров на винклеровском основании // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 44–54. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-44-54>

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание в области научной деятельности, научный проект № FEW-2023-0012).

Original article

CONTACT PROBLEM FOR A POROELASTIC CYLINDER OF FINITE DIMENSIONS ON A WINKLER FOUNDATION

Mikhail I. Chebakov^{1✉}, Elena M. Kolosova²

^{1, 2} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ michebakov@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-2075-1760>

² ekolossova@srfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0254-8160>

© Чебаков М.И., Колосова Е.М., 2025

Abstract. In the article, based on the equations of the theory of poroelastic bodies of Cowin-Nunziato, an axisymmetric contact problem of the interaction of a rigid stamp with a poroelastic cylinder of finite dimensions lying on a Winkler foundation is considered. It is assumed that the stamp base has a flat shape and a paraboloid of revolution, there is no friction in the contact zone. The cylinder rests on the Winkler foundation, and on the lateral surface of the cylinder there are no normal displacements and tangential stresses. The stamp moves vertically by a certain value using a given force. The problem posed, based on the representation of unknown displacements in the cylinder and the function, describing the change of the volume fraction of pores, in the form of series in Bessel functions, is reduced relative to the distribution function of contact stresses under the stamp to an integral equation of the first kind, the transform of the kernel of which is given in explicit form. To solve the integral equation, the collocation method is used, which allows finding contact stresses and the dependence of the value of the applied force on the displacement of the stamp. A comparative analysis of the studied values for different values of the Winkler foundation parameters, the porosity of the cylinder and its geometric parameters is carried out.

Keywords: contact problem, porous materials, Winkler foundation, poroelasticity, Cowin-Nunziato model, axisymmetric problem, cylinder, collocation method, indentation

For citation: Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact Problem for a Poroelastic Cylinder of Finite Dimensions on a Winkler Foundation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):44-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-44-54>

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State task in the field of scientific activity, scientific project No. FEW-2023-0012).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Теория Ковина – Нунзиато упругих материалов с пустотами является одним из распространенных обобщений классической теории упругости и рассматривает упругие материалы с распределенными по объему небольшими незаполненными порами (пустотами). Практическое значение она имеет при исследовании различных типов геологических, биологических и синтетических пористых материалов, для которых классическая теория не подходит. Теория упругости пористых материалов с пустыми порами была представлена Ковиным и Нунзиато в [1, 2]. В отсутствие поля объемной доли пор она сводится к классической теории упругости. Общая теория Ковиным и Нунзиато была довольно хорошо изучена и использовалась в последние годы во многих исследованиях [3–8], подробный обзор которых можно найти в [9]. В [9–13] решены некоторые осесимметричные контактные задачи для различных пороупругих оснований на основе теории Ковина – Нунзиато, в [14] и других – некоторые контактные задачи для различных конструкций, взаимодействующих с винклеровским основанием.

Точность предложенной схемы решения задач протестирована на аналогичных задачах для упругого и пороупругого цилиндра, решения которых для некоторых значений параметров приведены в [15, 16].

Постановка задачи

В цилиндрической системе координат (r, φ, z) рассмотрим осесимметричную контактную задачу о взаимодействии жесткого штампа с пороупругим цилиндром $0 \leq z \leq h$, $r \leq R$, деформация которого описывается соотношениями Ковина и Нунзиато [2]. Предполагается, что основание цилиндрического штампа – плоское (задача 1) или имеет форму параболоида вращения (задача 2). Схематическая постановка задач изображена на рис. 1, 2.

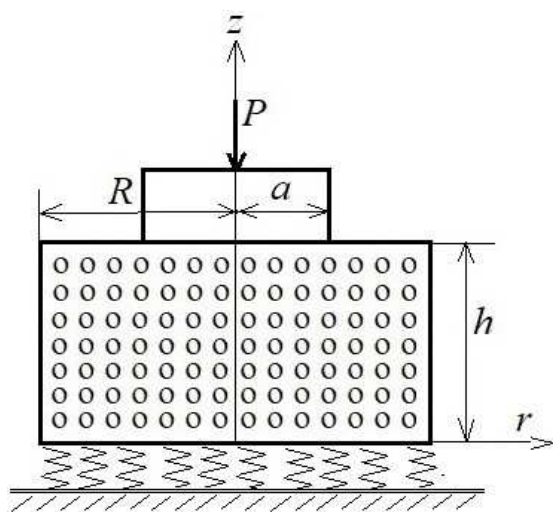


Рис. 1. Постановка задачи 1
 / Fig. 1. Problem statement 1

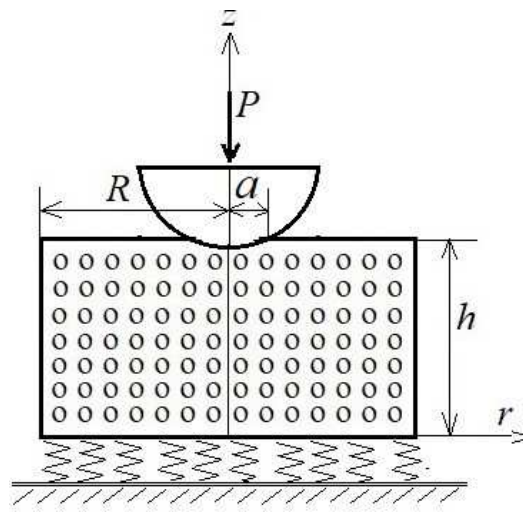


Рис. 2. Постановка задачи 2
 / Fig. 2. Problem statement 2

Деформация однородного изотропного материала с пустотами, согласно теории Ковина – Нунзиато, в цилиндрических координатах описывается следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных [2]:

$$\begin{aligned}
 (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial r} + \mu \left(\Delta u - \frac{u}{r^2} \right) + \beta \frac{\partial \Phi}{\partial r} &= 0, \\
 (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \Delta w + \beta \frac{\partial \Phi}{\partial z} &= 0, \quad \alpha \Delta \Phi - \xi \Phi - \beta \theta = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad \theta = \frac{u}{r} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Здесь μ и λ – коэффициенты Ламэ; α – коэффициент пустотной диффузии; β – параметр связи микродилатационных и макродилатационных свойств; ξ – пустотная жесткость; функция $\Phi(r, z)$ описывает изменение объемной доли пор; u и w – перемещения, соответственно, вдоль осей r и z . В случае $\beta = 0$ мы имеем упругую деформацию цилиндра.

Компоненты тензора напряжений определяются из соотношений [2]

$$\sigma_z = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \beta \Phi, \quad \tau_{rz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right).$$

Граничные условия поставленной задачи при $r=R$, $z=h$ и $z=0$ запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 \tau_{rz}(r, z) &= 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad w(r, z) = \delta(r) \quad (z = h, r \leq a), \\
 \sigma_z(r, z) &= 0, \quad \tau_{rz}(r, z) = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (z = h, a \leq r \leq R), \\
 \tau_{rz}(r, z) &= 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \sigma_z(r, z) = Cw(r, z) \quad (z = 0), \\
 \tau_{rz}(r, z) &= 0, \quad u(r, z) = 0 \quad (0 \leq z \leq h, r = R),
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $\delta(r)$ – перемещение границы цилиндра $z=h$ под воздействием штампа; C – коэффициент постели винклеровского основания.

Построение интегрального уравнения

Предварительно будем считать, что нормальные напряжения в зоне контакта известны: $\sigma_z(r, h) = q(r)$. В дальнейшем для их определения будет построено интегральное уравнение (9).

Найдем решение системы (1) с граничными условиями

$$\begin{aligned} \tau_{rz}(r, z) = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \sigma_z(r, z) = q(r) \quad (z = h, r \leq a), \\ \sigma_z(r, z) = 0, \quad \tau_{rz}(r, z) = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (z = h, a \leq r \leq R), \\ \tau_{rz}(r, z) = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \sigma_z(r, z) = Cw(r, z) \quad (z=0), \\ \tau_{rz}(r, z) = 0, \quad u(r, z) = 0 \quad (0 \leq z \leq h, r = R). \end{aligned} \quad (3)$$

Для этого представим неизвестные функции в системе (1) в виде рядов по функциям Бесселя:

$$\begin{aligned} u(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} A(u_k, z) J_1(u_k r), \quad w(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} B(u_k, z) J_0(u_k r), \\ \Phi(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} F(u_k, z) J_0(u_k r), \end{aligned} \quad (4)$$

где $J_i(u_k)$ ($i=0,1$) – функции Бесселя. Для того чтобы выполнялось граничное условие при $r=R$, необходимо в качестве u_k взять корни уравнения $J_1(u_k R) = 0$. Тогда для отыскания неизвестных функций $A(u_k, z)$, $B(u_k, z)$, $F(u_k, z)$ на основе соотношений (1) и (3) получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка и соотношения для них при $z=h$ и $z=0$. В дальнейшем для построения интегрального уравнения относительно контактных напряжений потребуется выражение для функции $B(u_k, 0)$. В случае $l_2=1$

$$\begin{aligned} B(u_k, 0) = \frac{Q_k}{2\mu(1-c^2)} L(u_k), \quad L(u_k) = \frac{L_1(u_k)}{L_2(u_k)}, \\ L_1(u) = L_{11} ch(Th) [ch(2hu) - 1] + sh(Th) [L_{12} ch(2hu) + L_{13} sh(2hu) + L_{14}], \\ L_2(u) = ch(Th) [ch(2uh) L_{21} + sh(2uh) L_{22} + L_{23}] + \\ + sh(Th) [ch(2uh) L_{24} + sh(2uh) L_{25} + L_{26}] + ch(uh) L_{27} + sh(uh) L_{28}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} L_{11} = 16 f T N c^2 N_1^2 u^4, \quad L_{12} = -4 N_1^4 T^2, \quad L_{13} = -8 f u N_1^2 T^2 (c^2 N_3 + N_1^2), \\ L_{14} = -4 N_1^3 T^2 (4 f d u^2 N_2 - N_1), \quad L_{21} = 16 N T c^2 u^3 N_1^2, \\ L_{22} = 64 f N T c^2 u^4 (2 N u^2 c^2 + N_1 N_2), \quad L_{23} = 16 N T c^2 u^3 N_1 (8 f d u^2 N_2 - N_1), \\ L_{24} = 16 f u \{ c^4 [-8 N^2 u^6 + 4 N N_1^2 u^4 + (4 N - 1) N_1^2 u^2 + N_1^3] - N_1^2 T^2 (2 c^2 N_3 + N_1^2) \}, \\ L_{25} = -8 N_1^2 T^2 (N_1^2 + c^2 N_3), \quad L_{26} = -16 u d N_1^3 T^2 N_2 + 16 f (c^4 S_4 + c^2 S_2 + S_0), \\ L_{27} = -128 f N T c^2 h u^5 N_1 N_2, \quad L_{28} = 128 f N T c^2 u^4 (-2 N c^2 u^2 - N_1 N_2), \\ S_4 = 8 N^2 u^7 - 2 N_1^2 (2 N - h^2) u^5 - N_1^2 (2 h^2 N_1 + 4 N - 1) u^3 - N_1^3 u, \\ S_2 = 4 N_1^2 (h^2 N_1 + N) u^5 - 2 N_1^3 (2 h^2 N_1 + 2 N - 1) u^3 - 2 N_1^4 u, \\ S_0 = N_1^4 [2 h^2 u^5 - (2 h^2 N_1 - 1) u^3 - N_1 u], \\ N = H l_2^2 / l_1^2, \quad N_1 = N - 1, \quad T = \sqrt{u^2 - N + 1}, \quad N_2 = c^2 + N - 1, \quad N_3 = N(2 u^2 + 1) - 1. \end{aligned}$$

Здесь $f = \mu / C$ – приведенный коэффициент постели винклеровского основания; Q_k – коэффициенты разложения контактных напряжений $q(r)$ в ряд по функциям Бесселя

$$q(r) = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k J_0(u_k r), \quad Q_k = 2R^{-2} J_0^{-2}(u_k R) \int_0^a q(r) J_0(u_k r) r dr. \quad (6)$$

Для определения Q_k использовано условие ортогональности цилиндрических функций [17]

$$\int_0^R r J_0(u_k r) J_0(u_n r) dr = 0 \quad (k \neq n); \quad \frac{R^2}{2} J_0^2(u_k R) \quad (k = n),$$

притом что, как отмечено выше, u_k являются корнями уравнения $J_1(u_k R) = 0$.

Выше использованы обозначения [5]:

$$c^2 = \frac{\mu}{(\lambda + 2\mu)}, \quad H = \frac{\beta}{\lambda + 2\mu}, \quad l_1^2 = \frac{\alpha}{\beta}, \quad l_2^2 = \frac{\alpha}{\xi}.$$

Функция $L(u)$ при $u \rightarrow 0$ и $u \rightarrow \infty$ имеет следующее поведение:

$$\lim_{u \rightarrow 0} L(u) = \frac{f}{1-\nu} - \frac{h(N-1)}{4N(\nu-1)+2} \quad (u \rightarrow 0) \quad \lim_{u \rightarrow \infty} uL(u) = 1 \quad (u \rightarrow \infty).$$

Используя (4) и (5), найдем

$$w(r, h) = \frac{1}{2\mu(1-c^2)} \sum_{k=1}^{\infty} Q_k L(u_k) J_0(u_k r). \quad (7)$$

Подставляя в (7) выражение (6) для Q_k и используя третье граничное условие из (2) ($w(r, z) = \delta(r)$ ($z = h, r \leq a$)), получим после несложных преобразований интегральное уравнение для определения контактных напряжений $q(r)$

$$\int_0^a q(\rho) \rho k(\rho, r) d\rho = \frac{\mu}{1-\nu} \delta(r) \quad (r \leq a), \quad (8)$$

$$k(\rho, r) = \frac{2}{R^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{L(u_k)}{J_0^2(u_k R)} \rho J_0(u_k r) J_0(u_k \rho), \quad J_1(u_k R) = 0. \quad (9)$$

Здесь u_k – корни уравнения $J_1(u_k R) = 0$, также использовано соотношение $2(1-c^2) = (1-\nu)^{-1}$; ν – коэффициент Пуассона.

Если подошва штампа плоская, то $\delta(r) = \delta = const$; если подошва штампа имеет форму параболоида вращения, то $\delta(r) = \delta - r^2 / (2R_1)$, где R_1 – кривизна основания штампа в первоначальной точке касания штампа и цилиндра.

Заметим, что в случае $l_2 \neq 1$ величины контактных напряжений и приложенной силы, соответственно, примут значения $\tilde{q}(r) = q(r/l_2)$ и $\tilde{P} = Pl_2$ [5]. При этом размер области контакта, перемещение штампа, высота и ширина упругого цилиндра будут иметь значения $\tilde{a} = al_2$, $\tilde{\delta} = \delta l_2$, $\tilde{h} = hl_2$ и $\tilde{R} = Rl_2$. В дальнейшем приводим результаты при $l_2 = 1$ и знак волны опускаем.

Если $f = 0$, то интегральное уравнение будет соответствовать аналогичной контактной задаче для пороупругого цилиндра при $L_1(u) = 4(N-1)^4 (u^2 - N + 1) \sinh(Th) [1 - \cosh(2hu)]$,

$$L_2(u) = S_1 \cosh(Th) [\cosh(2uh) - 1] + \sinh(Th) [\sinh(2uh) S_2 + S_3],$$

$$S_1 = 16NTc^2 u^3 (N-1)^2, \quad S_2 = -8(N-1)^2 T^2 [(2Nu^2 + N-1)c^2 + (N-1)^2], \quad S_3 = -16uh(N-1)^3 T^2 (c^2 + N-1).$$

Такая задача рассмотрена в [16].

Если $N = 0$ и $f = 0$, то интегральное уравнение будет соответствовать аналогичной контактной задаче для упругого цилиндра при

$$L(u) = \frac{\cosh(2uh) - 1}{u(\sinh(2uh) + 2uh)}.$$

Такие задачи рассматривались в работах [15, 18, 19].

Решение интегрального уравнения

Для решения интегрального уравнения (8), (9) с символом ядра $L(u_k)$ из (5) применим прямой метод коллокаций [20]. Разобьем отрезок $[0, a]$ на n частей набором точек $b_j = \varepsilon j$ ($\varepsilon = a/n$, $j = 0, 1, \dots, n$) и будем считать, что на каждом отрезке $[b_{j-1}, b_j]$ контактные напряжения имеют постоянное значение q_j . Пусть $r_k = (b_k + b_{k-1})/2$ – точки коллокаций, тогда интегральное уравнение дискретизируем по следующей схеме:

$$\sum_{j=1}^n q_j \int_{b_{j-1}}^{b_j} k(\rho, r_k) d\rho = \frac{\delta(r_k) \mu}{1-\nu} \quad (k = 1, 2, \dots, n).$$

В результате приходим к системе для определения q_j

$$\sum_{j=1}^n q_j a_{kj} = \frac{\delta(r_k) \mu}{1-\nu} \quad (k = 1, 2, \dots, n), \tag{10}$$

$$a_{kj} = \frac{2}{R^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{L(u_m) J_0(u_m r_k)}{u_m J_0^2(u_m R)} [b_j J_1(u_m b_j) - b_{j-1} J_1(u_m b_{j-1})]. \tag{11}$$

Силу, действующую на штамп, найдем из соотношения

$$P = 2\pi \int_0^a q(r) r dr = 2\pi \varepsilon \sum_{k=1}^n q_k r_k.$$

При выводе соотношения (11) использовалось значение интеграла [21]

$$\int \rho J_0(u_m \rho) d\rho = \rho u_m^{-1} J_1(u_m \rho).$$

Числовые расчеты

Для задач 1 и 2 проведены числовые расчеты величин, при этом для задачи 1 будем считать $a = 1$:

$$q^*(r) = \frac{1-\nu}{\mu \delta} q(r), \quad P^* = \frac{1-\nu}{\mu \delta} P.$$

Для контроля точности результатов на примере задачи 1 рассмотрим случай при $N = 0$, $f = 0$, что соответствует ранее исследованной в ряде работ контактной задаче для упругого цилиндра, и сравним результаты расчетов с аналогичными [15, с. 70, табл. 2.2].

В табл. 1 при $N = 0$, $h = 0,5$, $f = 0$ и некоторых значениях R приведены значения величин $q^*(0)$ и P^* , в строках 3, 5 – значения из [15, табл. 2.2]. Полученные результаты расчетов показывают хорошее совпадение с ранее известными.

Отметим, что на основе сравнительных оценок при проведении расчетов в системе (10) количество уравнений, а в сумме (11) количество слагаемых выбирались из расчета, чтобы относительная погрешность вычислений не превышала 1 %.

Таблица 1 / Table 1

Контактные напряжения $q^*(0)$ и сила P^* при $N = 0, f = 0$. Задача 1
 / Contact stresses $q^*(0)$ and force P^* at $N = 0, f = 0$. Problem 1

R	1,1	1,3	1,5	2
P^*	14,26	14,88	14,74	14,68
P^* [15]	14,26	14,92	14,76	14,54
$q^*(0)$	3,976	3,934	3,942	3,935
$q^*(0)$ [15]	3,976	3,897	3,857	3,835

В табл. 2 для сравнения с табл. 1 приведены аналогичные результаты при $N = 0,5$ и $h = 0,5$, которые показывают, что при наличии пор и основания Винклера контактные напряжения и сила уменьшаются при одном и том же значении перемещения штампа δ .

Таблица 2 / Table 2

Контактные напряжения $q^*(0)$ и сила P^* при $N=0,5$. Задача 1
 / Contact stresses $q^*(0)$ and force P^* at $N=0,5$. Problem 1

R	1,1	1,3	1,5	2
$P^*, f=0$	8,773	10,12	10,87	12,01
$P^*, f=1$	2,041	2,654	3,030	3,114
$q^*(0), f=0$	2,442	2,656	2,867	3,157
$q^*(0), f=1$	0,531	0,475	0,414	0,370

Расчеты показывают, что наличие винклеровского основания несколько снижает зависимость силы и контактных напряжений от величины пористости цилиндра. Например, в задаче 1 в случае $d = 1, R = 1,5, f = 1$ (наличие винклеровского основания) при $N = 0$ величина силы равна $P^* = 3,12$, а при $N = 0,5 - P^* = 2,71$. Если же $d = 1, R = 1,5, f = 0$ (отсутствие винклеровского основания) при $N = 0$ величина силы равна $P^* = 8,85$, а при $N = 0,5 - P^* = 6,22$. В первом случае зависимость силы P^* от N составляет 12,9 %, а во втором случае – 29,7 %.

В табл. 3 для задачи 1 приведены результаты расчетов силы P^* и контактных напряжений $q(r)$ при $h = 0,5, R = 1,1$ и $N = 0,5$ при некоторых значениях коэффициента постели f винклеровского основания.

Таблица 3 / Table 3

Контактные напряжения $q^*(r)$ и сила P^* при $h=0,5, R=1,1, N=0,5$
 / Contact stresses $q^*(r)$ and force P^* at $h=0,5, R=1,1, N=0,5$

f	P^*	$q^*(0)$	$q^*(0,2)$	$q^*(0,4)$	$q^*(0,6)$	$q^*(0,8)$
0,0	8,773	2,444	2,442	2,438	2,442	2,537
0,25	4,805	1,279	1,280	1,285	1,311	1,404
0,50	3,310	0,870	0,871	0,877	0,899	0,970
1,00	2,041	0,531	0,532	0,537	0,552	0,599
2,00	1,155	0,299	0,299	0,302	0,312	0,339
3,00	0,805	0,208	0,208	0,210	0,217	0,237

В табл. 4 для задачи 1 приведены результаты расчетов силы P^* и контактных напряжений $q^*(r)$ при $h = 0,5, f = 1$ и $N = 0,5$ при некоторых значениях радиуса цилиндра R .

Таблица 4 / Table 4

**Контактные напряжения $q^*(r)$ и сила P^* при $h=0,5, N=0,5, f=1$
 / Contact stresses $q^*(r)$ and force P^* at $h=0,5, N=0,5, f=1$**

R	P^*	$q^*(0)$	$q^*(0,2)$	$q^*(0,4)$	$q^*(0,6)$	$q^*(0,8)$
1,1	2,041	0,531	0,532	0,537	0,552	0,599
1,2	2,366	0,506	0,508	0,517	0,555	0,676
1,3	2,654	0,475	0,475	0,484	0,540	0,738
1,2	3,030	0,414	0,408	0,408	0,479	0,795
2	3,114	0,370	0,354	0,335	0,394	0,765
3	3,097	0,380	0,367	0,347	0,402	0,758

В табл. 5 для задачи 2 при $R^* = R_1 \delta = 1, N = 0,5$ и при $R = 1,5, h = 1$ и $R = 1,1, h = 0,5$ приведены расчеты силы P^* и контактных напряжений $q^*(0)$ в первоначальной точке касания штампа и поверхности цилиндра.

Таблица 5 / Table 5

**Контактные напряжения $q^*(0)$, сила P^* и величина области контакта a . Задача 2
 / Contact stresses $q^*(0)$, force P^* and the size of the contact area a . Problem 2**

f	$R=1,5; R_1=1; N=0,5, h=1$			$R=1,1; R_1=1; N=0,5, h=0,5$		
	a	P^*	$q^*(0)$	a	P^*	$q^*(0)$
0	1,134	4,373	1,753	1,080	6,375	2,885
0,25	1,075	3,189	1,368	1,020	3,457	1,490
0,5	1,020	2,551	1,199	0,970	2,387	1,059
1	0,933	1,856	1,033	0,895	1,489	0,727
2	0,825	1,236	0,889	0,800	0,864	0,521
3	0,755	0,940	0,815	0,730	0,615	0,452

На рис. 3а, б для задачи 1 при $N=0,5$ и некоторых значений параметра f приведены графики распределения контактных напряжений под штампом, на рис. 3а, б – $h=1, R=1,5$ и $h=0,5, R=1,1$, соответственно.

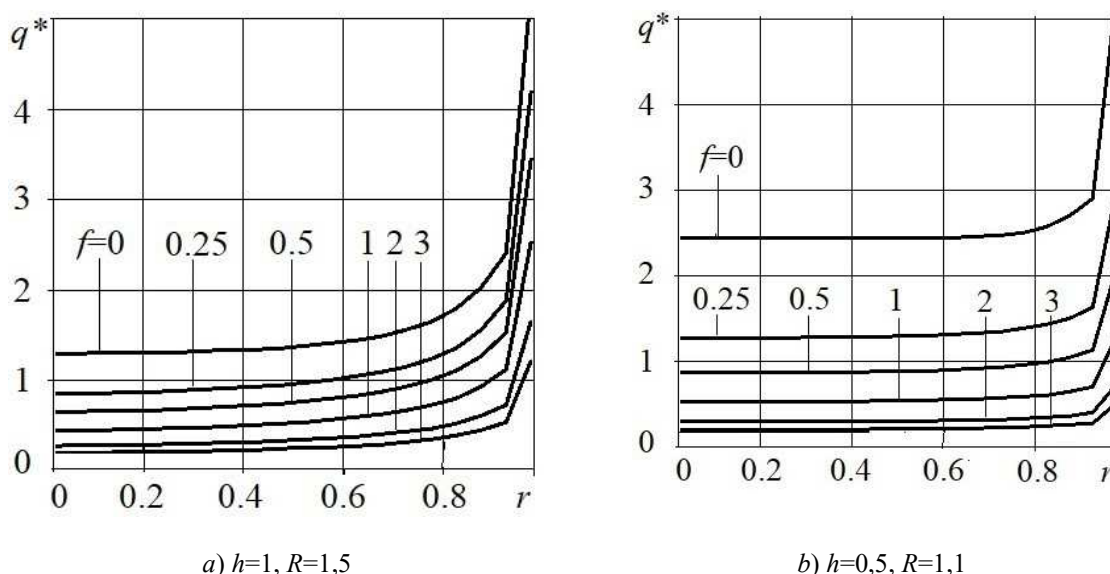


Рис. 3. Контактные напряжения под штампом при $R^*=1, N=0,5$. Задача 1
 / Fig. 3. Contact stresses under the stamp at $R^*=1, N=0,5$. Problem 1

На рис. 4а, б для задачи 2 при $N=0,5$, $R^*=1$ и некоторых значений параметра f приведены графики распределения контактных напряжений под штампом: на рис. 4а – параметры $h=1$, $R=1,5$, а на рис. 4б – $h=0,5$, $R=1,1$.

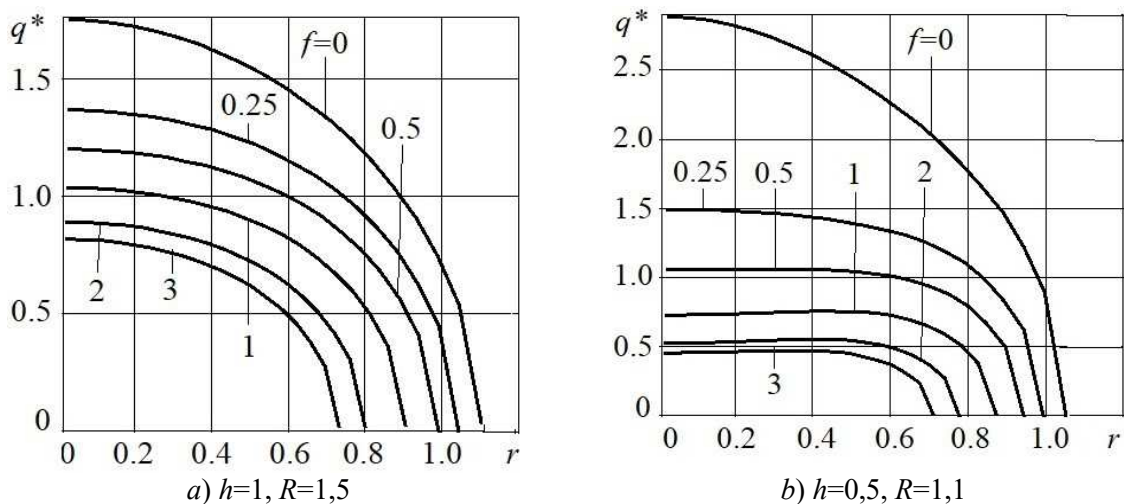


Рис. 4. Контактные напряжения под штампом при $R^*=1$, $N=0,5$. Задача 2
/ Fig. 4. Contact stresses under the stamp at $R^*=1$, $N=0,5$. Problem 2

Выводы

На основе уравнений теории поропругих тел Ковина – Нунзиато рассмотрены осесимметричные контактные задачи о взаимодействии жесткого штампа с поропругим цилиндром конечных размеров, лежащим на основании Винклера. Предполагалось, что основание штампа имеет плоскую форму и форму параболоида вращения, в зоне контакта отсутствует трение. Цилиндр опирается на винклеровское основание, а на боковой поверхности цилиндра отсутствуют нормальные перемещения и касательные напряжения.

Как показывают расчеты, при увеличении параметра пористости N и приведенного коэффициента постели f винклеровского основания при фиксированных значениях других параметров контактные напряжения и приложенная сила уменьшаются при одинаковой величине перемещения штампа δ . Это можно проследить по результатам, отраженным в приведенных таблицах и рисунках. В задаче 1 при увеличении радиуса цилиндра R приложенная к штампу сила увеличивается до значения, соответствующего аналогичной задаче для слоя, а контактные напряжения при $q(0)$ уменьшаются при фиксированных значениях остальных параметров. В задаче 2 при увеличении приведенного коэффициента постели винклеровского основания f уменьшаются размеры области контакта и высота цилиндра при одинаковых значениях перемещения штампа δ и при фиксированных значениях остальных параметров, в том числе и параметра h , характеризующего высоту цилиндра. Расчеты показывают, что наличие винклеровского основания несколько снижает зависимость силы и контактных напряжений от величины пористости цилиндра.

Список источников

1. Nunziato J.W., Cowin S.C. A nonlinear theory of elastic materials with voids // Arch Ration Mech Anal. 1979. Vol. 72. P. 175–201.
2. Cowin S.C., Nunziato J.W. Linear theory of elastic materials with voids // J. Elast. 1983. Vol. 13. P. 125–147.
3. Iesan D. A theory of thermoelastic materials with voids // Acta Mech. 1986. Vol. 60. P. 67–89.
4. Chandrasekharaiah D.S. Effects of surface stresses and voids on Rayleigh waves in an elastic solid // Int. J. Eng. Sci. 1987. Vol. 25. P. 205–211.
5. Scalia A., Sumbatyan M.A. Contact problem for porous elastic half-plane // J. Elasticity. 2000. Vol. 60. P. 91–102.
6. Iovane G., Nasedkin A.V. Modal analysis of piezoelectric bodies with voids. I. Mathematical approaches // Applied Mathematical Modelling. 2010. Vol. 34. P. 60–71.

7. Iovane G., Nasedkin A.V. Finite element dynamic analysis of anisotropic elastic solids with voids // *Computers and Structures*. 2009. Vol. 87. P. 981–989.
8. Chebakov M., Kolosova E., Iankov R., Datcheva M. Contact problem for a rigid flat stamp and a linear elastic strip bonded to porous half-plane // *J. of Theoretical and Applied Mechanics*. 2021. Vol. 51, № 3. P. 391–404. EDN: ICRPZU.
9. Chebakov M.I., Poddubny A.A., Kolosova E.M., Alexiev A.R., Iankov R.Z. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic layer // *Comptes rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*. 2020. Vol. 73, № 6. P. 846–855. EDN: UTWTPU. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.06.13>
10. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of an axisymmetric punch and a poroelastic layer fixed on an elastic base // *Mechanics of Solids*. 2022. Vol. 57, № 3. P. 508–514. <https://doi.org/10.3103/S0025654422030098>
11. Chebakov M.I., Poddubny A.A., Kolosova E.M., Alexiev A., Datcheva M. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic foundation // *Materials Physics and Mechanics*. 2020. Vol. 44. P. 423–432. https://doi.org/10.18720/MPM.4432020_13
12. Kolosova E.M., Chebakov M.I. Analytical solution of axisymmetric contact problem for a poroelastic layer // *Mechanics of Solids*. 2020. Vol. 55, № 6. P. 857–864. EDN: PQIAPV. <https://doi.org/10.3103/S0025654420050118>
13. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of axisymmetric stamp and elastic layer fixed on poroelastic base // *Mechanics of Composite Materials*. 2021. Vol. 56, № 6. P. 769–778. EDN: XDFLMD. <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09922-9>
14. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of a stamp and a poroelastic strip lying on a Winkler base // *Mechanics of Composite Materials*. 2024. Vol. 59, № 6. P. 1169–1180. <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10164-0>
15. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 304 с.
16. Chebakov M.I., Kolosova E.M., Datcheva M.D. Contact interaction of a rigid stamp and a porous elastic cylinder of finite dimensions // *Mathematics*. 2025. Vol. 13, № 1. Art. 104. EDN: JCRLSA. <https://doi.org/10.3390/math13010104>
17. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. 832 с.
18. Чебаков М.И. Метод однородных решений в смешанной задаче для кругового цилиндра конечных размеров // *ПММ*. 1979. Т. 43, вып. 6. С. 1073–1081.
19. Чебаков М.И. Некоторые динамические и статистические контактные задачи теории упругости кругового цилиндра конечных размеров // *ПММ*. 1980. Т. 44, вып. 5. С. 923–933.
20. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. 256 с.
21. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. 1108 с.

References

1. Nunziato J.W., Cowin S.C. A nonlinear theory of elastic materials with voids. *Arch Ration Mech Anal*. 1979;72:175-201.
2. Cowin S.C., Nunziato J.W. Linear theory of elastic materials with voids. *J. Elast*. 1983;13:125-147.
3. Iesan D. A theory of thermoelastic materials with voids. *Acta Mech*. 1986;60:67-89.
4. Chandrasekharaiah D.S. Effects of surface stresses and voids on Rayleigh waves in an elastic solid. *Int. J. Eng. Sci*. 1987;25:205-211.
5. Scalia A., Sumbatyan M.A. Contact problem for porous elastic half-plane. *J. Elasticity*. 2000;60:91-102.
6. Iovane G., Nasedkin A.V. Modal analysis of piezoelectric bodies with voids. I. Mathematical approaches. *Applied Mathematical Modelling*. 2010;34:60-71.
7. Iovane G., Nasedkin A.V. Finite element dynamic analysis of anisotropic elastic solids with voids. *Computers and Structures*. 2009;87:981-989.
8. Chebakov M., Kolosova E., Iankov R., Datcheva M. Contact problem for a rigid flat stamp and a linear elastic strip bonded to porous half-plane. *J. of Theoretical and Applied Mechanics*. 2021;51(3):391-404. EDN: ICRPZU.
9. Chebakov M.I., Poddubny A.A., Kolosova E.M., Alexiev A.R., Iankov R.Z. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic layer. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*. 2020;73(6):846-855. EDN: UTWTPU. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.06.13>

10. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of an axisymmetric punch and a poroelastic layer fixed on an elastic base. *Mechanics of Solids*. 2022;57(3):508-514. <https://doi.org/10.3103/S0025654422030098>
11. Chebakov M.I., Poddubny A.A., Kolosova E.M., Alexiev A., Datcheva M. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic foundation. *Materials Physics and Mechanics*. 2020;44:423-432. https://doi.org/10.18720/MPM.4432020_13
12. Kolosova E.M., Chebakov M.I. Analytical solution of axisymmetric contact problem for a poroelastic layer. *Mechanics of Solids*. 2020;55(6):857-864. EDN: PQIAPV. <https://doi.org/10.3103/S0025654420050118>
13. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of axisymmetric stamp and elastic layer fixed on poroelastic base. *Mechanics of Composite Materials*. 2021;56(6):769-778. EDN: XDFLMD. <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09922-9>
14. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of a stamp and a poroelastic strip lying on a Winkler base. *Mechanics of Composite Materials*. 2024;59(6):1169-1180. <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10164-0>
15. Alexandrov V.M., Chebakov M.I. *Analytical methods in contact problems of elasticity theory*. Moscow: Publishing House of Physical, Mathematical and Technical Literature; 2004. 304 p. (In Russ.).
16. Chebakov M.I., Kolosova E.M., Datcheva M.D. Contact interaction of a rigid stamp and a porous elastic cylinder of finite dimensions. *Mathematics*. 2025;13(1):104. EDN: JCRLSA. <https://doi.org/10.3390/math13010104>
17. Abramowitz M., Stigán I., eds. *Handbook of special functions with formulas, graphs and mathematical tables*. Moscow: Science, Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature; 1979. 832 p. (In Russ.).
18. Chebakov M.I. The method of homogeneous solutions in a mixed problem for a circular cylinder of finite dimensions. *Applied Mathematics and Mechanics*. 1979;43(6):1073-1081. (In Russ.).
19. Chebakov M.I. Some dynamic and statistical contact problems of the theory of elasticity of a circular cylinder of finite dimensions. *Applied Mathematics and Mechanics*. 1980;44(5):923-933. (In Russ.).
20. Belotserkovsky S.M., Lifanov I.K. *Numerical methods in singular integral equations and their application to aerodynamics, elasticity theory, electrodynamics*. Moscow: Science, Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature; 1985. 256 p. (In Russ.).
21. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Tables of integrals, sums, series and products*. Moscow: Science, Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature; 1971. 1108 p. (In Russ.).

Информация об авторах

М.И. Чебаков – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией механики деформируемых тел и конструкций Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

Е.М. Колосова – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики деформируемых тел и конструкций Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

M.I. Chebakov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laboratory of Mechanics of Deformable Bodies and Structures, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.
E.M. Kolosova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Laboratory of Mechanics of Deformable Bodies and Structures, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.

*Статья поступила в редакцию 07.06.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 07.06.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 10.07.2025.*

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 551.554

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-55-65>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ С ПРОЦЕССАМИ ГРАДООБРАЗОВАНИЯ

*Анатолий Хабасович Аджиев^{1✉}, Геннадий Владимирович Куповых²,
Аида Анатольевна Аджиева³, Залина Музариновна Керефова⁴*

^{1, 4} *Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия*

² *Южный федеральный университет, Таганрог, Россия*

³ *Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия*

¹ *adessa1@yandex.ru✉*

² *kipovykh@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9584-6858>*

³ *aida-adzhieva@mail.ru*

⁴ *zknyaz-kbsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0180-3759>*

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований взаимосвязи грозовой активности конвективных облаков с процессами градообразования на основе данных грозопеленгационной сети и радиолокаторов МРЛ-5. Из обширных наблюдений проанализированы выбранные материалы по эволюции 30 мощных конвективных облаков, развивающихся на территории Северной Осетии – Алании в 2024 г. Выявлено значительное изменение амплитуды токов молнии положительной и отрицательной полярностей при засеивании градового облака кристаллизующими реагентами. Данный вывод получен на примерах градовых облаков на территории Северной Осетии – Алании 7 и 25 июня 2024 г. Показано, что воздействие на град приводит к значительному уменьшению амплитуды наземных молний отрицательной полярности. После внесения в облако реагента положительные молнии не фиксировались.

Ключевые слова: грозовая активность, молниевый разряд, град, конвективное облако, опасные явления погоды

Для цитирования: Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Аджиева А.А., Керефова З.М. Исследование взаимосвязи грозовой активности конвективных облаков с процессами градообразования // Изв. вузов. Сев. Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 55–65. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-55-65>

Благодарности: работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 23-17-20001).

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THUNDERSTORM ACTIVITY OF CONVECTIVE CLOUDS AND THE PROCESSES OF HAIL FORMATION

Anatoly Kh. Adzhiev^{1✉}, Gennady V. Kupovykh², Aida A. Adzhieva³, Zalina M. Kerefova⁴

^{1, 4} High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

² Southern Federal University, Taganrog, Russia

³ Kookov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

¹ adessa1@yandex.ru✉

² kupovykh@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9584-6858>

³ aida-adzhieva@mail.ru

⁴ zknyaz-kbsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0180-3759>

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the relationship between the thunderstorm activity of convective clouds and hail formation processes based on the data of the lightning direction-finding network and MRL-5 radars. From the extensive observational material, selected materials on the evolution of 30 powerful convective clouds that developed in the territory of North Ossetia-Alania in 2024 were analyzed. A significant change in the amplitude of lightning currents of positive and negative polarities was revealed when seeding a hail cloud with crystallizing reagents. This conclusion is shown on the examples of hail clouds that developed in the territory of North Ossetia-Alania on June 7 and June 25, 2024. It is shown that the impact on hail leads to a significant decrease in the amplitude of ground lightning of negative polarity. After the reagent was introduced into the cloud, positive lightning was not recorded in the cloud.

Keywords: thunderstorm activity, lightning discharge, hail, convective cloud, hazardous weather phenomena

For citation: Adzhiev A.Kh., Kupovykh G.V., Adzhieva A.A., Kerefova Z.M. Study of the Relationship Between Thunderstorm Activity of Convective Clouds and the Processes of Hail Formation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):55-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-55-65>

Acknowledgments: the work was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation (Agreement No. 23-17-20001).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

В России и ряде зарубежных стран ведутся работы по активным воздействиям на процессы облако- и осадкообразования, основанные на управлении фазовыми переходами воды в атмосфере [1–3]. При этом существенные результаты достигаются при использовании кристаллизующих реагентов для вызывания осадков [4, 5], рассеяния облаков [5], предотвращения градобитий [6, 7].

Исполнительный совет Всемирной метеорологической организации (ВМО), признавая актуальность широкого внедрения методов и средств активных воздействий для решения задач продовольственного обеспечения растущего населения планеты, указывает на наличие ряда нерешенных проблем научного плана: недостаточно изучены факторы антропогенного влияния продолжительности работ по активному воздействию на окружающую среду; отсутствует достаточное число прямых доказательств трансформации облака под действием кристаллизующих и гигроскопических реагентов, что не позволяет однозначно оценить реакцию облака на засев (ВМО рекомендует привлекать новую измерительную аппаратуру и методы математического моделирования облачных процессов); нет возможности точного прогноза потенциального количества и вида осадков из под-вергаемого воздействию облака при естественном его развитии, на фоне которого можно было бы

оценивать эффективность искусственно вызванных осадков (ВМО также рекомендует выявить необходимые предикторы естественного развития облака, объективные методы измерения и определения качества оперативных воздействий); не разработаны концепции активных воздействий на наиболее мощные осадкообразующие облачные системы и конвективные потоки (тропические циклоны, смерчи, торнадо).

Таким образом, существенной задачей активных воздействий на процессы облако- и осадкообразования является оценка физического эффекта результатов засева реагента. Внесение льдообразующих реагентов ускоряет процесс замерзания переохлажденных облачных водяных капель и рост градовых частиц [7], а это, как следствие, сопровождается разделением электрических зарядов и увеличением молниевой активности. Факторы, вызывающие разделение электрических зарядов, – фазовые переходы и микрофизические процессы образования осадков. Их выпадение, а также вертикальные потоки атмосферного воздуха приводят к возникновению разноименно заряженных электрических неоднородностей; повышение напряженности электрического поля до критического значения – причина молниевых разрядов между разными объемами облака, между облаком и землей.

В 80-е гг. XX в. было показано, что при активных воздействиях на конвективные облака реагентами, ускоряющими процесс образования ледяной фазы, создаются условия для возникновения импульсного электромагнитного излучения с максимумами в диапазонах 8–20 и 32–50 МГц [8], что связано с разделением электрических зарядов. В тот период имевшаяся в распоряжении исследователей аппаратура не позволяла связать обнаруженное излучение с молниевыми разрядами.

В настоящее время появились высокоэффективные системы местоопределения разрядов молнии: наземные (положительные и отрицательные) и облачные – грозопеленгационные [9].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование взаимосвязи грозовой активности конвективных облаков с процессами градообразования на основе данных грозопеленгационной сети.

Материалы и методы исследования

Для исследования динамики грозовой активности грозоградовых конвективных облаков при их естественном развитии и активных воздействий с целью предотвращения градобитий в данной работе использованы: многолетние данные грозопеленгационной сети ФГБУ «ВГИ», система аккредитована в Министерстве образования и науки РФ в составе уникальной научной установки (УНУ) ВГИ (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/77736/>); многолетние радиолокационные характеристики конвективных облаков, полученные с использованием метеорологических радиолокаторов МРЛ-5 ФГБУ «СК ВС»; аппаратно-программный комплекс для совмещения координат разрядов молнии с радиоэхом конвективных облаков.

Система грозопеленгации, установленная впервые в России на Северном Кавказе в 2008 г. [9], в настоящее время состоит из центрального сервера и 6 датчиков (4 LS8000 и 2 LS7002). Грозопеленгатор LS8000 – из двух датчиков – LF и VHF: VHF-датчик регистрирует только облачные молниевые разряды, LF-датчик – молниевые разряды облако – земля.

Грозопеленгатор LS7002 имеет только один сенсор, но за счет совершенствования аппаратной и программной части грозопеленгатора этот сенсор фиксирует как наземные, так и облачные молниевые разряды, LS7002 гораздо компактнее, что облегчает его установку и обслуживание.

На территории Российской Федерации Росгидрометом развернуты 3 сети грозопеленгаторов на базе датчиков LS фирмы Vaisala, Финляндия: на Северном Кавказе, в Московской области и на Дальнем Востоке.

Система грозопеленгации Росгидромета охватывает всю территорию европейской части России, Дальнего Востока (Хабаровский край, Амурская область, Еврейская автономная область) и о. Сахалин.

Грозопеленгационная сеть состоит из 30 датчиков LS8000 и LS7002. Европейский сегмент включает 14 датчиков, объединенных в единую сеть из 6 (4 LS8000 и 2 LS7002) и сеть в Московской области из 8 датчиков.

Мониторинг радиолокационных характеристик конвективных облаков проведен по данным наблюдений программно-технического комплекса АСУ-МРЛ ФГБУ «СК ВС». Он обеспечивал синхронное получение и обработку данных 10 см канала радиолокатора МРЛ-5 [2] – радиолокационный обзор пространства через каждые 3,5 мин; обработку радиолокационной информации

об облаках и осадках в радиусе 250 км; формирование и отображение карт максимальной отражаемости, горизонтальных сечений на любой высоте, вертикальных сечений в любом азимуте, карт размера и кинетической энергии града, интенсивности и количества осадков, карт вертикально интегрированного водосодержания (VIL) и т.д. (около 30 различных карт); измерение более 50 одномерных, двумерных и трехмерных параметров облачной системы и ее отдельных ячеек; управление активными воздействиями на облака с целью предотвращения града и искусственного увеличения осадков; ввод данных сети грозопеленгаторов LS8000 и визуализацию пеленгов грозовых разрядов на фоне карт максимальной отражаемости, VIL или любой другой. Алгоритмы обработки информации в АСУ-МРЛ приведены в [2, 6].

В период с 01.04.2016 по 30.09.2024 собран обширный экспериментальный материал, включающий данные наблюдений конвективной облачности на территории Северного Кавказа в течение 450 дней с грозой и 200 дней с градом. Были получены совмещенные в реальном масштабе времени радиолокационные и грозопеленгационные данные. Число файлов обзора в рассмотренные дни с градом варьировало от 90 до 300. В периоды, когда облака находились в зоне действия ракетных пунктов Краснодарской, Ставропольской и Северо-Кавказской военизированных противорадовых служб Росгидромета, на них проводилось воздействие с целью предотвращения града. Из обширных наблюдений для анализа в данной работе выбраны материалы по эволюции 30 мощных конвективных облаков, развивавшихся на территории Северной Осетии – Алании в 2024 г. (табл. 1, 2).

Таблица 1 / Table 1

Дни выпадения града на территории РСО-Алании за 2024 г.
/ Hail days in the Republic of North Ossetia-Alania in 2024

Дата	Район	Размер, см
31.05.2024	–	До 1,5
07.06.2024	Ардонский	До 2,0
25.06.2024	Ирафский и Дигорский	
23.08.2024	Дигорский	

Мониторинг осуществлялся, если град выпадал из облака, которое подвергнуто воздействию льдообразующим реагентом. Град, выпавший вне защищаемой территории, не фиксировался.

Таблица 2 / Table 2

Количество дней с грозой и продолжительность гроз на территории РСО-Алании за 2024 г.
/ Number of days with thunderstorms and duration of thunderstorms in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania for 2024

Месяц	Количество дней	Продолжительность, ч:мин
Апрель	4	13:56
Май	5	39:57
Июнь	8	48:33
Июль	3	15:24
Август	7	50:19
Сентябрь	3	19:17

Рассмотрены следующие дни выпадения града:

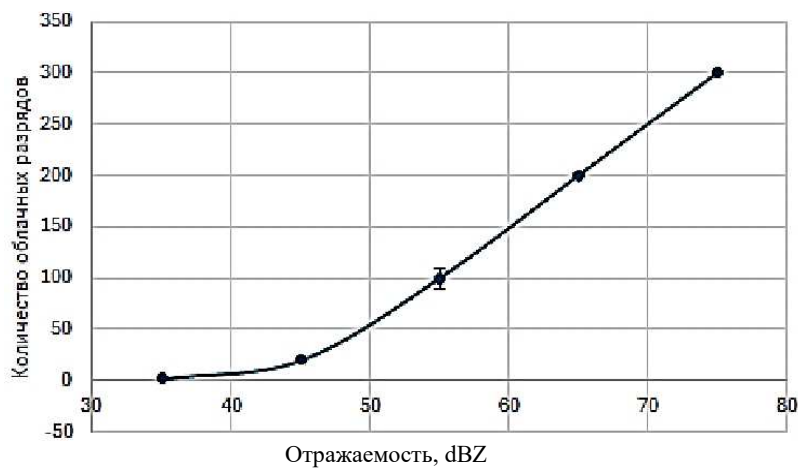
- 31.05.2024 – гроза началась в 04:49 и закончилась в 23:43. Продолжительность – 18 ч 54 мин;
- 07.06.2024 – гроза началась в 14:32 и закончилась в 17:04; продолжительность – 2 ч 32 мин, град имел радиус до 2 см;
- 23.08.2024 – гроза началась в 00:27 и закончилась в 23:58. Продолжительность – 23 ч 31 мин.

Данные по грозопеленгационной сети за 25.06.2024 отсутствовали, так как система не работала в этот день.

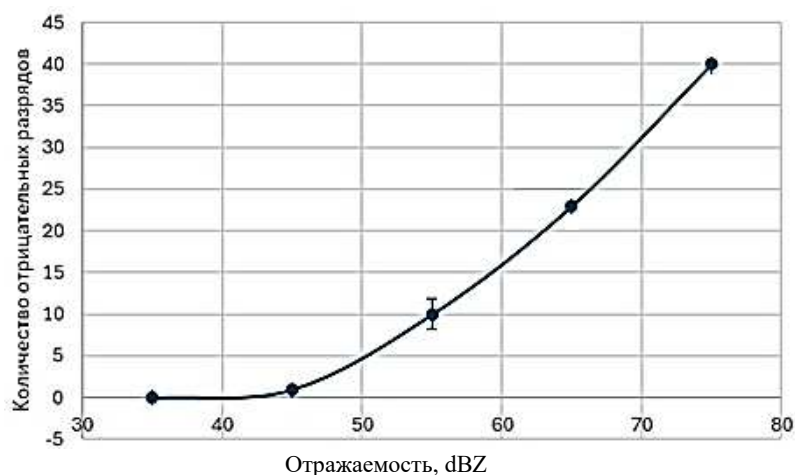
Большинство случаев выпадения града пришлось на май – август, когда конвективные процессы достигают наибольшей интенсивности.

Результаты и их обсуждение

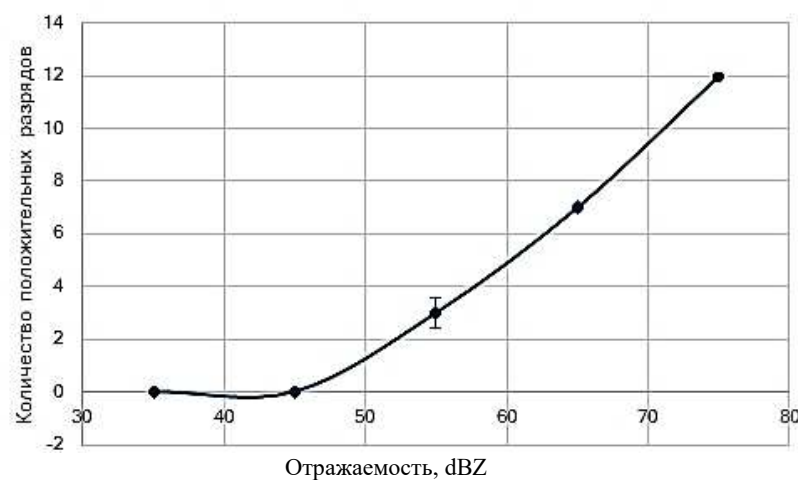
Анализ экспериментального материала показал, что в развивающихся грозоградовых конвективных облаках происходят облачные разряды. Наряду с облачными молниями фиксируются и наземные. Облачные молнии в развивающихся конвективных облаках Северного Кавказа начинаются после достижения радиолокационной отражаемости 35 dBZ (рис. 1а).



а/а



б/б



в/в

Рис. 1. Зависимость интенсивности молниевых разрядов облака от отражаемости / Fig. 1. Dependence of the intensity of lightning discharges of the cloud on reflectivity

По мере дальнейшего развития облака и усиления процесса осадко- и градообразования частота внутриоблачных разрядов растет, достигая около 300 молний в минуту при отражаемости облака около 75 dBZ.

Разряды молнии облако – земля отрицательной полярности в конвективном облаке начинаются, когда отражаемость облака – 42–45 dBZ, частота – до 40 разрядов/мин при отражаемости 75 dBZ (рис. 1б); положительной – отражаемость – 45 dBZ, частота – 10–12 разрядов/мин при 75 dBZ (рис. 1в).

По классификации Национальной администрации США (NOAA) (исследование океана и атмосферы) 35 dBZ соответствует умеренному дождю, 45 dBZ – сильному, при 65 dBZ – град, а при отражаемости более 70 dBZ – крупный град.

На рис. 1 вертикальной линией показан разброс данных при 5%-й обеспеченности.

Это объясняется тем, что процессы роста дождевых капель, их разбрызгивание, образование и деление кристаллов, зарождение и рост града приводят к электризации облачных частиц [10]. Пространственный разнос вертикальными потоками мелких и крупных частиц, имеющих разноименные заряды, формирует разноименно заряженные зоны в облаке и вызывает рост напряженности электрического поля до пробойных значений. Развитие молниевых разрядов в облаках обусловлено разделением электрических зарядов и формированием разноименно заряженных зон в облаке. В настоящее время общепризнана реализация в облаке до 20 механизмов электризации облачных частиц. Наиболее интенсивные разделения электрических зарядов связаны с замерзанием капель воды и выпадением осадков. При замерзании капель воды на границе разных фаз воды и льда возникает значительная разность потенциалов – 200 В [11], а процесс замерзания сопровождается раскалыванием на несколько частей замерзающей капли или выбросом микрочастиц (рис. 2). В работе [12] показано, что интенсивность разделения электрических зарядов прямо пропорциональна замерзающей массе воды. При этом крупные фракции льда заряжаются отрицательным зарядом, мелкие – положительным.

Обзоры работ, посвященных теории разделения электрических зарядов при фазовых переходах воды, изложены в [13–17].

Анализ радиолокационных характеристик исследованных градовых облаков показал, что частота всех типов разрядов растет с увеличением радиолокационной отражаемости Z_{max} , высоты верхней границы (HZ_i) и объема (VZ_i) изолиний Z_i – 45, 55, 65, 75 dBZ, а также с увеличением вертикально интегрированного (VIL) и объемно интегрального (MZi) водосодержания облаков.

В табл. 3 представлены характеристики градовых облаков на территории Северной Осетии – Алании в 2024 г. Градообразование в облаках имело место при отражаемости 59–70 dBZ.

Засев градовых облаков кристаллизующими реагентами приводит к повышению частоты молниевых разрядов всех типов (особенно внутриоблачных), что, по-видимому, связано с интенсификацией процесса кристаллизации облачных капель и формированием кристаллов [18].

Нами выявлено значительное изменение амплитуды токов молнии положительной и отрицательной полярностей при засеве градового облака кристаллизующими реагентами. На рис. 3 представлены примеры градовых облаков на территории Северной Осетии – Алании 07.06.2024 и 25.06.2024, в период активных воздействий в указанные дни, цветовая индикация – отражаемость различных областей грозоградовых облаков.

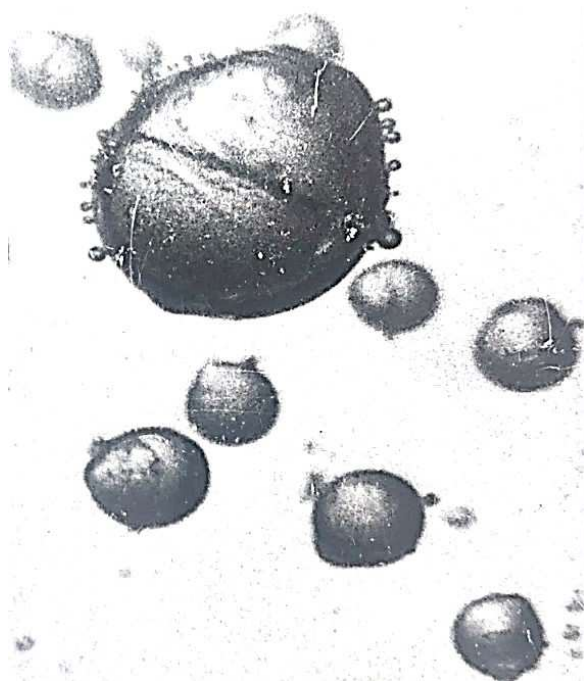


Рис. 2. Замерзающие капли воды с выдавленными частицами (фото авторов) / Fig. 2. Freezing water droplets with squeezed out particles (Photo by the authors)

Таблица 3 / Table 3

**Характеристики градовых облаков на территории Северной Осетии-Алании в мае – июне 2024 г.
 / Characteristics of hail clouds in the territory of North Ossetia-Alania in May-June 2024**

Дата	Время	Метеоявление	Zmax, dBZ
31.05.2024	16:01	Град слабый	59
	16:08	Град умеренный	63
	16:18		62
	16:22	Гроза	60
	16:32		59
07.06.2024	15:37	Град слабый	65
	15:45	Град умеренный	66
	16:04		63
	16:08	Град слабый	63
	16:22		65
25.06.2024	14:20	Град сильный	70
	14:23		69
	14:27	Град умеренный	67
	14:38		64
	14:59		65
	15:06		62
	15:31		70
	15:38	Град сильный	75
	16:21	Град умеренный	65
	16:24		65
	18:18		66

По пространственному строению и структуре радиоэха облака представляли собой суперъячейку с обширным навесом радиоэха и областью слабого радиоэха, указывающего на наличие обширной струи восходящего потока. По радиолокационным данным суперъячейки достигли максимума своего развития в 16 и 14 ч 07.06.2024 и 25.06.2024 соответственно. По данным наземных наблюдений, из этих облаков выпадали град и интенсивные ливневые осадки, сопровождавшиеся ураганным ветром. Размер града достигал 3, а местами – 4 см и более.

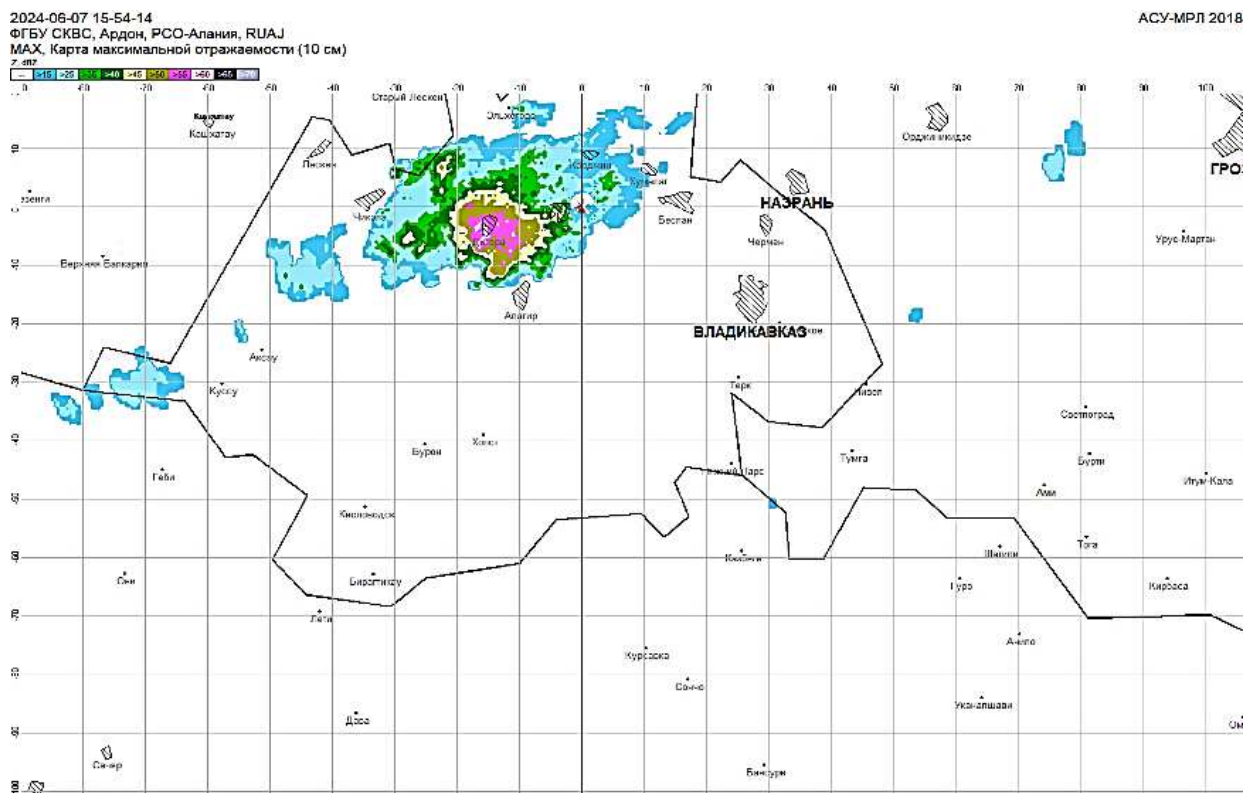
Количество выпавших осадков – от 30 до 50 мм, что привело к паводкам и подтоплению улиц некоторых городов и сел.

По данным ГПС ФГБУ «ВГИ», LS8000/7002 были получены значения пикового тока молний в периоды воздействия на град (рис. 4).

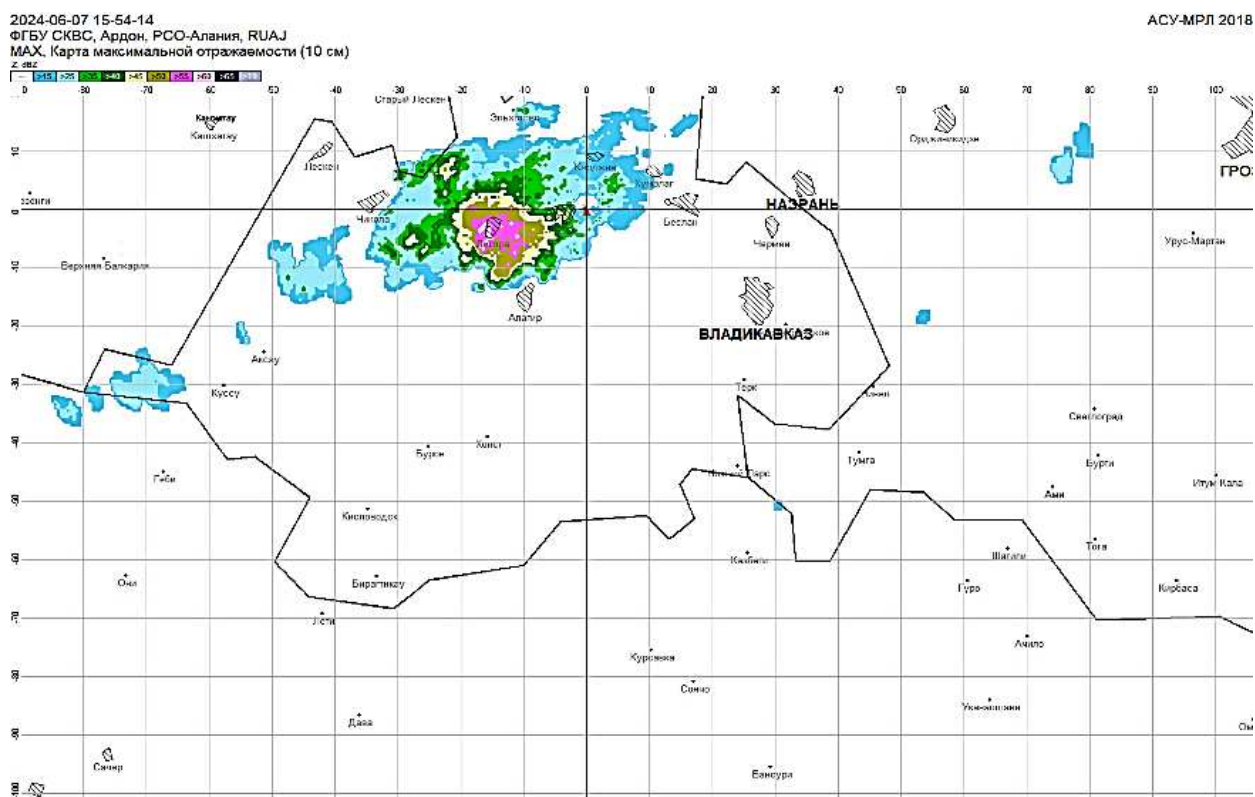
Зафиксировано 49 отрицательных и 6 положительных разрядов 31.05.2024, с 16:00 до 17:01. Наибольшее значение пикового тока – 48 кА, наименьшее ... –90 кА, среднее ... –24,5 кА. Воздействие на град привело к значительному уменьшению амплитуды наземных молний отрицательной полярности (рис. 4а). После внесения в облако реагента с 16:19 до 16:40 положительные разряды молнии не фиксировались. Они возобновились с 16:40, после завершения активных воздействий. Аналогичная ситуация имела место и при других воздействиях на град 07.06.2024 и 23.08.2024 (рис. 4б, в).

Всего в период воздействий на град с 15:35 и до 16:33 07.06.2024 было зафиксировано 56 разрядов, из них 50 отрицательных и 6 положительных. Наибольшее значение пикового тока – 64 кА, наименьшее ... –55 кА, среднее ... –15,7 кА.

Всего в период воздействий на град 23.08.2024, с 16:56 до 20:33, было зафиксировано 74 разряда молний, все отрицательные. Наименьшее значение пикового тока ... – 94 кА, среднее ... –25,8 кА.



а/а



б/б

Рис. 3. Карта отражаемости грозового облака: а – 07.06.2024; б – 25.06.2024
/ Fig. 3. Thunderstorm cloud reflectivity map: a - June 7, 2024; b - June 25, 2024

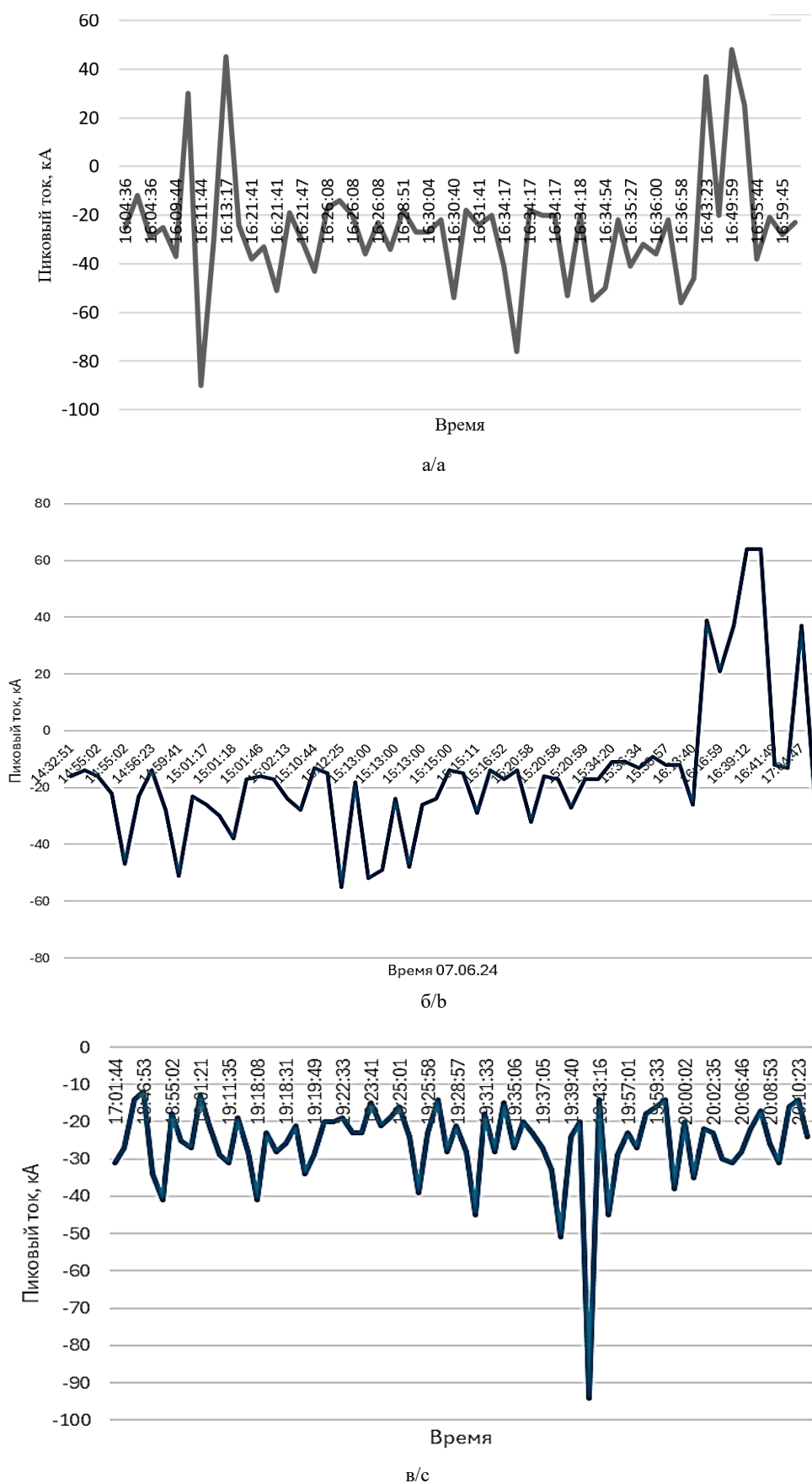


Рис. 4. Положительные и отрицательные наземные разряды молнии в период активных воздействий на град: а – 31.05.2024, б – 07.06.2024, в – 23.08.2024 / Fig. 4. Positive and negative ground lightning discharges during the period of active impacts on hail: a - May 31, 2024; b - June 7, 2024; c - August 23, 2024

Заключение

Выполнены экспериментальные исследования взаимосвязи грозовой активности конвективных облаков с процессами градообразования на основе данных грозопеленгационной сети и радиолокаторов МРЛ-5. В период с 01.04.2016 по 30.09.2024 получен обширный экспериментальный материал, включающий данные наблюдений конвективной облачности на территории Северного Кавказа (450 дней с грозой и 200 дней с градом). Тогда же были получены совмещенные в реальном масштабе времени радиолокационные и грозопеленгационные данные. Из обширных наблюдений для анализа в данной работе выбраны материалы по эволюции 30 мощных конвективных облаков на территории Северной Осетии – Алании в 2024 г.

Анализ радиолокационных характеристик исследованных градовых облаков показал, что частота всех типов разрядов растет с увеличением радиолокационной отражаемости Z_{\max} , высот верхней границы (HZ_i) и объема (VZ_i) изолиний Z_i (45, 55, 65, 75 dBZ), а также с увеличением вертикально интегрированного (VIL) и объемно интегрального (MZ_i) водосодержания облаков.

Показано, что воздействие на град приводит к значительному уменьшению амплитуды наземных молний отрицательной полярности. После внесения в облако реагента положительные молнии не фиксировались.

Список источников

1. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 455 с.
2. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Барекова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противорадовых работ. Нальчик: Печатный двор, 2014. 506 с.
3. Fukuta N. Paik Y. Water adsorption and ice nucleation on silver iodide surfaces // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 141. P. 1092–1100.
4. Аббас А., Колосков Б.П., Шипилов О.И. Предварительная статистическая оценка результатов работ по увеличению осадков в Сирии // Обозрение прикладной и промышленной математики. Серия: Вероятность и статистика. М.: ТВП, 1995. Вып. 2. С. 166–175.
5. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. СПб.: РГГМУ, 2012. 342 с.
6. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система управления противорадовыми операциями «АСУ-МРЛ» // Тр. науч.-практ. конф., посвященной 40-летию производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. Нальчик, 2011. С. 211–225.
7. Ашабоков Б.А., Залиханов М.Ч., Тапасханов В.О., Федченко Л.М., Шаповалов А.В. О состоянии исследований по физике градовых облаков и активных воздействий на них // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2012. № 5. С. 43–45. EDN: PFATEL.
8. Аджиев А.Х., Зильберман П.Ф., Сижжажев С.М., Тамазов С.Т. Радиоизлучение облаков, сопровождающее кристаллизацию переохлажденной воды // Метеорология и гидрология. 1989. № 10. С. 40–44.
9. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 5–11.
10. Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 279 с.
11. Качурин Л.Г. Электрический потенциал, возникающий при кристаллизации жидкости // Поверхностные явления в жидкостях. Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. 262 с.
12. Аджиев А.Х., Тамазов С.Т. Разделение электрических зарядов при кристаллизации капель воды // Метеорология и гидрология. 1987. № 8. С. 57–62
13. Мучник В.М., Фишман Б.Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 208 с.
14. Illingworth A.J. Charge separation in thunderstorms: Small scale processes // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90. P. 6026–6032.
15. Mason B.J., Maybank J. The fragmentation and electrification of freezing water drops // Quart. J. R. Meteor. Soc. 1960. Vol. 86. P. 176–186.
16. Ribeiro J.C. On the thermo-dielectric effect // Anais Acad. Bras. Cienc. 1950. Vol. 22. P. 325–347.
17. Workman E.J., Reynolds S.E. Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relationship to thunderstorm electricity // Phys. Rev. 1950. Vol. 78, № 3. P. 254–259.
18. Аджиев А.Х., Абшаев А.М., Тумгоева Х.А., Геккиева Ж.М. Исследования быстроразвивающихся опасных атмосферных процессов и разработка системы их мониторинга в интересах обеспечения безопасности жизнедеятельности // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2015. № 12. С. 33–37.

References

1. Kachurin L.G. *Physical foundations of influence on atmospheric processes*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1978. 455 p. (In Russ.).
2. Abshaev A.M., Abshaev M.T., Barekova M.V., Malkarova A.M. *Guide on the organization and conducting of anti-hail operations*. Nalchik: Printing Yard; 2014. 506 p. (In Russ.).
3. Fukuta N. Paik Y. Water adsorption and ice nucleation on silver iodide surfaces. *J. Appl. Phys.* 2014;141:1092-1100.
4. Abbas A., Koloskov B.P., Shipilov O.I. Preliminary statistical assessment of the results of work on increasing precipitation in Syria. *Review of applied and industrial mathematics, ser. Probability and statistics*. Moscow: TVP; 1995;(2):166-175. (In Russ.).
5. Koloskov B.P., Korneev V.P., Shchukin G.G. *Methods and means of modification of clouds, precipitation, and fogs*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University; 2012. 342 p. (In Russ.).
6. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Kotelevich A.F., Sirota N.V. Automated system for managing anti-hail operations "ASU-MRL". *Proceedings of the Scientific and Practical Conference Dedicated to the 40th Anniversary of Production Work on Protecting Agricultural Crops from Hailstorms*. Nalchik, 2011:211-225. (In Russ.).
7. Ashabokov B.A., Zalikhonov M.Ch., Tapashanov V.O., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V. On the state of research on the physics of hail clouds and active influences on them. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2012;(5):43-45. (In Russ.). EDN: PFATEL.
8. Adzhiev A.Kh., Zilberman P.F., Sizazhev S.M., Tamazov S.T. Radio emission of clouds accompanying the crystallization of supercooled water. *Meteorology and Hydrology*. 1989;(10):40-44. (In Russ.).
9. Adzhiev A.Kh., Stasenko V.N., Tapashanov V.O. The system of thunderstorm direction finding in the North Caucasus. *Meteorology and Hydrology*. 2013;(1):5-11. (In Russ.).
10. Mazin I.P., Khrigian A.Kh. *Clouds and the cloudy atmosphere*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1983. 279 p. (In Russ.).
11. Kachurin L.G. Electric potential arising during liquid crystallization. *Surface phenomena in liquids*. Leningrad: Leningrad State University Press; 1975. 262 p. (In Russ.).
12. Adzhiev A.Kh., Tamazov S.T. Separation of electric charges during crystallization of water droplets. *Meteorology and Hydrology*. 1987;(8):57-62. (In Russ.).
13. Muchnik V.M., Fishman B.E. *Electrization of coarse aerosols in the atmosphere*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1982. 208 p. (In Russ.).
14. Illingworth A.J. Charge separation in thunderstorms: Small scale processes. *J. Geophys. Res.* 1985;90:6026-6032.
15. Mason B.J., Maybank J. The fragmentation and electrification of freezing water drops. *Quart. J. R. Meteor. Soc.* 1960;86:176-186.
16. Ribeiro J.C. On the thermo-dielectric effect. *Anais Acad. Bras. Cienc.* 1950;22:325-347.
17. Workman E.J., Reynolds S.E. Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relationship to thunderstorm electricity. *Phys. Rev.* 1950;78(3):254-259.
18. Adzhiev A.Kh., Abshaev A.M., Tumgoeva Kh.A., Gekkieva Zh.M. Research of rapidly developing dangerous atmospheric processes and development of a system for monitoring them in the interests of ensuring life safety. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2015;(12):33-37. (In Russ.).

Информация об авторах

А.Х. Аджиев – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом стихийных явлений ВГИ.

Г.В. Куповых – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физико-математических основ инженерного образования Инженерно-технологической академии ЮФУ.

А.А. Аджиева – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики и информатики КБГАУ.

З.М. Кереева – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела стихийных явлений ВГИ.

Information about the authors

A.H. Adzhiev – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Natural Phenomena, HMGI.

G.V. Kupovykh – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Academy of Engineering and Technologies, SFedU.

A.A. Adzhieva – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor, Department of Higher Mathematics and Computer Science, KBSAU.

Z.M. Kerefova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Researcher, Department of Natural Phenomena, HMGI.

Статья поступила в редакцию 19.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 19.03.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 10.07.2025.

Научная статья

УДК 502.171:551.4:355.469.34

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-66-74>

СКОРОСТЬ СМЕЩЕНИЯ БЕРЕГОВ И ОБЪЕМЫ УТРАЧЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ В ПРЕДЕЛАХ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО МАТЕРИАЛАМ ОБСЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА И ИСТОРИЧЕСКИМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

**Вадим Васильевич Глинка¹, Владислав Владимирович Сапрыгин²,
Ольга Васильевна Ивлиева³, Людмила Александровна Беспалова⁴**

^{1, 2, 3, 4} Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Ростов-на-Дону, Россия

^{3, 4} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ vadim-glinka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5671-5740>

² vv.saprygin@gmail.com

³ ivlieva.o@mail.ru

⁴ bespalowaliudmila@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0245-7835>

Аннотация. По данным обследований Волгоградского водохранилища в 2023 г. с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и историческим спутниковым снимкам выполнена оценка скорости смещения берегов и утраты объемов земель. В основу оценки скорости смещения берегов и утраченных земель водоохранной зоны (ВЗ) Волгоградского водохранилища легли материалы, полученные ФГБУ «РосНИИВХ» в 2023 г. Было проведено дистанционное зондирование Земли участка ВЗ от с. Рахинка до с. Верхний Балыклей в Среднеахтубинском и Быковском районах с применением БПЛА: Phantom 4 Pro V2.0. и Phantom 4 Pro Advanced. Также использовали архивные космические снимки 2016 г. По результатам обследования высокие показатели смещения берега наблюдаются на участке от северной окраины с. Рахинка до 1 км на юг от с. Новоникольское. В среднем на данном участке скорость смещения берегов составляет 3 м/год. Высокие показатели смещения берегов наблюдаются в том числе на участке от северного входа в залив, расположенный в 7 км на север от с. Луговая Пролейка, и далее на север до с. Нижний Балыклей. В среднем на данном участке скорость смещения берегов составляет 2,1 м/год. Объем обрушения грунта на обследованном участке за период с 2016 по 2023 г. составил 3 813 760 м³.

Ключевые слова: Волгоградское водохранилище, водоохранная зона, мониторинг, БПЛА, смещение берегов, объемы утраченных земель

Для цитирования: Глинка В.В., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. Скорость смещения берегов и объемы утраченных земель в пределах Волгоградского водохранилища по материалам обследований с использованием БПЛА и историческим спутниковым данным // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 66–74. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-66-74>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

SHORELINE DISPLACEMENT RATES AND VOLUMES OF LOST LANDS WITHIN THE VOLGOGRAD RESERVOIR BASED ON UAV SURVEYS AND HISTORICAL SATELLITE DATA

Vadim V. Glinka¹, Vladislav V. Saprygin², Olga V. Ivlieva³, Ludmila A. Bespalova⁴

^{1, 2, 3, 4} Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don, Russia

^{3, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

© Глинка В.В., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., 2025

¹ vadim-glinka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5671-5740>

² vv.saprygin@gmail.com

³ ivlieva.o@mail.ru

⁴ bespalowaliudmila@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-0245-7835>

Abstract. According to surveys of the Volgograd reservoir conducted in 2023 using UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) and historical satellite imagery, an assessment of shoreline displacement rates and the volumes of lost land was performed. The assessment of shoreline displacement rates and the loss of lands in the water protection zone of the Volgograd reservoir was based on data obtained by Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources in 2023. Remote sensing of the water protection zone section from the village of Rakhinka to the village of Verkhny Balykley in the Sredneakhtubinsky and Bykovsky districts was conducted using UAVs: Phantom 4 Pro V2.0 and Phantom 4 Pro Advanced. Archival satellite images from 2016 were also used. The survey results revealed significant shoreline displacement rates in the area from the northern outskirts of Rakhinka to 1 km south of Novonikolskoe village. On average, in this area, the shoreline displacement rate is 3 meters per year. Significant shoreline displacement was also observed in the area from the northern entrance of the bay, located 7 km north of the village of Lugovaya Proleyka, extending further north to the village of Nizhny Balykley. On average, in this area, the shoreline displacement rate is 2.1 meters per year. The estimated volume of ground collapse in the surveyed area during the period from 2016 to 2023 amounted to 3,813,760 m³.

Keywords: Volgograd reservoir, water protection zone, monitoring, UAV, shoreline displacement, volumes of lost land

For citation: Glinka V.V., Saprygin V.V., Ivlieva O.V., Bespalova L.A. Shoreline Displacement Rates and Volumes of Lost Lands within the Volgograd Reservoir Based on UAV Surveys and Historical Satellite Data / *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):66-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-66-74>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

За основу оценки скорости смещения берегов и утраченных земель водоохранной зоны (ВЗ) Волгоградского водохранилища взяты материалы, полученные ФГБУ «РосНИИВХ» в 2023 г. Было проведено дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) участка ВЗ от с. Рахинка до с. Верхний Балыклей в Среднеакhtubинском и Быковском районах с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) Phantom 4 Pro V2.0 и Phantom 4 Pro Advanced. Также были проанализированы архивные космические снимки 2016 г.

Волновая абразия берегов является основной причиной смещения береговой линии водохранилища. Абразионным процессом охвачена основная, наиболее протяженная часть береговой линии Волгоградского водохранилища, что составляет 82,7 % исследуемого участка берега. Исключение составляет побережье заливов и балок, где волновая активность практически отсутствует.

Материалы и методы исследования

В первую очередь полученные в ходе ДЗЗ материалы (фотографии в надир) обрабатывали в программном обеспечении AgisoftMetashape Professional. Методом цифровой фотограмметрии строили цифровые модели поверхности (ЦМП) и ортофотопланы земной поверхности [1–3]. При помощи программного инструментария ГИС проводили дальнейшую камеральную обработку и анализ полученных ЦМП и ортофотопланов. В результате выполнено взаимное позиционирование ортофотопланов, ЦМП и снимков спутниковой съёмки по выраженным на местности стационарным антропогенным и природным объектам, доступным для дешифрирования как на космоснимках, так и на ортофотопланах. В среднем на 10 км береговой линии выделено 10–15 таких опорных точек.

Помимо этого, проводилось дешифрирование берегового уступа по ранее полученным материалам: съёмка с БПЛА (2023 г.), архивные космические снимки (2016 г.). Данные исследования послужили материалами для дальнейшего анализа среднемноголетних показателей смещения берега и объемов обрушения грунта за многолетний период.

Площадь утраченных земель за период наблюдений (2016–2023 гг.) оцифровали в виде многоугольника между двумя береговыми уступами и разбили на относительно однородные по высоте и строению берега ячейки. Средняя протяжённость ячейки вдоль берегового уступа составила 200 м.

По построенным ЦМП определили среднюю высоту берега в каждой ячейке как разницу высот у подножия и на вершине уступа (там, где берега не покрыты сплошной растительностью).

Объем обрушения грунта, m^3 , вычисляли по формуле:

$$V = S \times h,$$

где S – площадь утраченных земель в ячейке, m^2 ; h – высота, м.

Скорость обрушения грунта, m^3 на пог. м в год:

$$Vp = \frac{V}{L \times t},$$

где V – объем утраченной земли в ячейке, m^3 ; L – длина берегового уступа в ячейке, м; t – период, год.

Среднее многолетнее смещение берегового уступа:

$$Sm = \frac{S}{L \times t},$$

где S – площадь утраченных земель в ячейке, m^2 ; L – длина берегового уступа в ячейке, м; t – период, год.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных вычислений составлены картосхемы среднемноголетних значений отступления бровки берегового уступа побережья Волгоградского водохранилища (рис. 1, 2) и объемов утраченных земель (рис. 3, 4).

Высокие показатели смещения берега наблюдаются на участке левого берега Волгоградского водохранилища от северной окраины с. Рахинка (на протяжении 1 км) до с. Новоникольское. В среднем на данном участке скорость смещения берегов составляет 3 м/год с максимальным показателем 5,8 м/год. На небольшом участке возле рыбной фермы, где расположено берегозащитное сооружение протяженностью 453 м (бетонные блоки), берег зарос кустарниковой растительностью, разрушение берегового обрыва на этом отрезке берега незначительно либо отсутствует.

Также высокие показатели смещения берегов зафиксированы на участке от северного входа в залив (в 7 км к северу от с. Луговая Пролейка) до с. Нижний Балыклей. В среднем на данном участке скорость смещения составляет 2,1 м/год с максимальным показателем 3,2 м/год и минимальным 0,2 м/год.

Высокие показатели объема обрушения грунта наблюдаются на участке от северной окраины с. Рахинка до южной окраины с. Новоникольское. В среднем здесь фиксируется 14 m^3 /год на 1 пог. м. с максимальным показателем до 26,3 m^3 /год.

На участке от 6 км к северу от с. Луговая Пролейка до с. Нижний Балыклей также отмечены высокие показатели. Средний объем обрушения здесь составляет 13 m^3 /год с максимумом 19,8 m^3 /год и минимумом 0,2 м/год.

Активное разрушение левого берега Волгоградского водохранилища обусловлено тем, что его надводные уступы сложены рыхлыми, слабоустойчивыми к размыву отложениями. Этот участок расположен в пределах Прикаспийской синеклизы и характеризуется слабой расчлененностью. В литологическом составе преобладают суглинки, пластинчатые трещиноватые глины, местами – супеси и слабоуплотненные или рыхлые пески (эолового и древнеаллювиального происхождения) [4, 5].

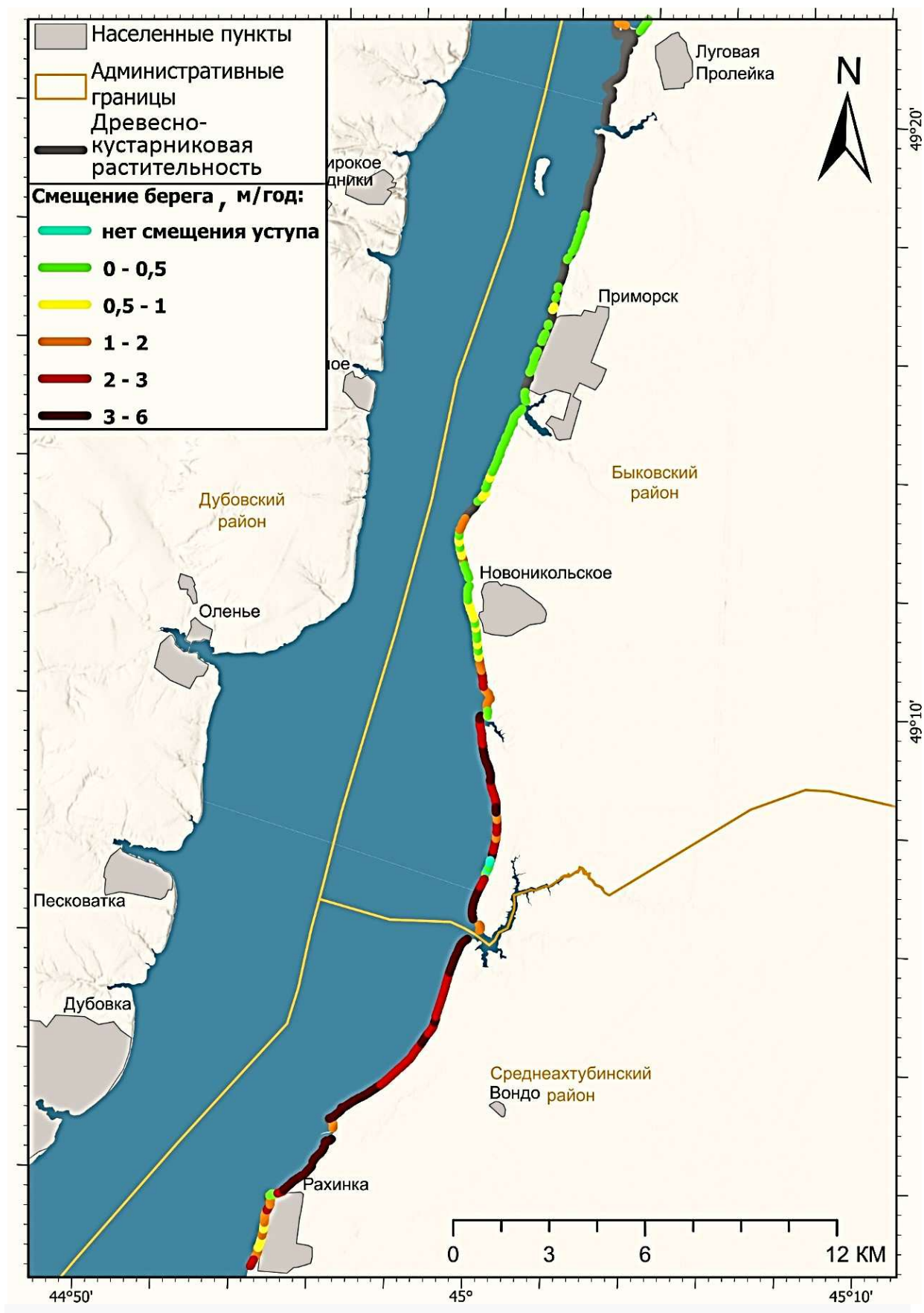


Рис. 1. Скорость смещения берега на левом берегу Волгоградского водохранилища (нижний участок)
/ Fig. 1. The rate of shore displacement on the left bank of the Volgograd Reservoir (lower section)

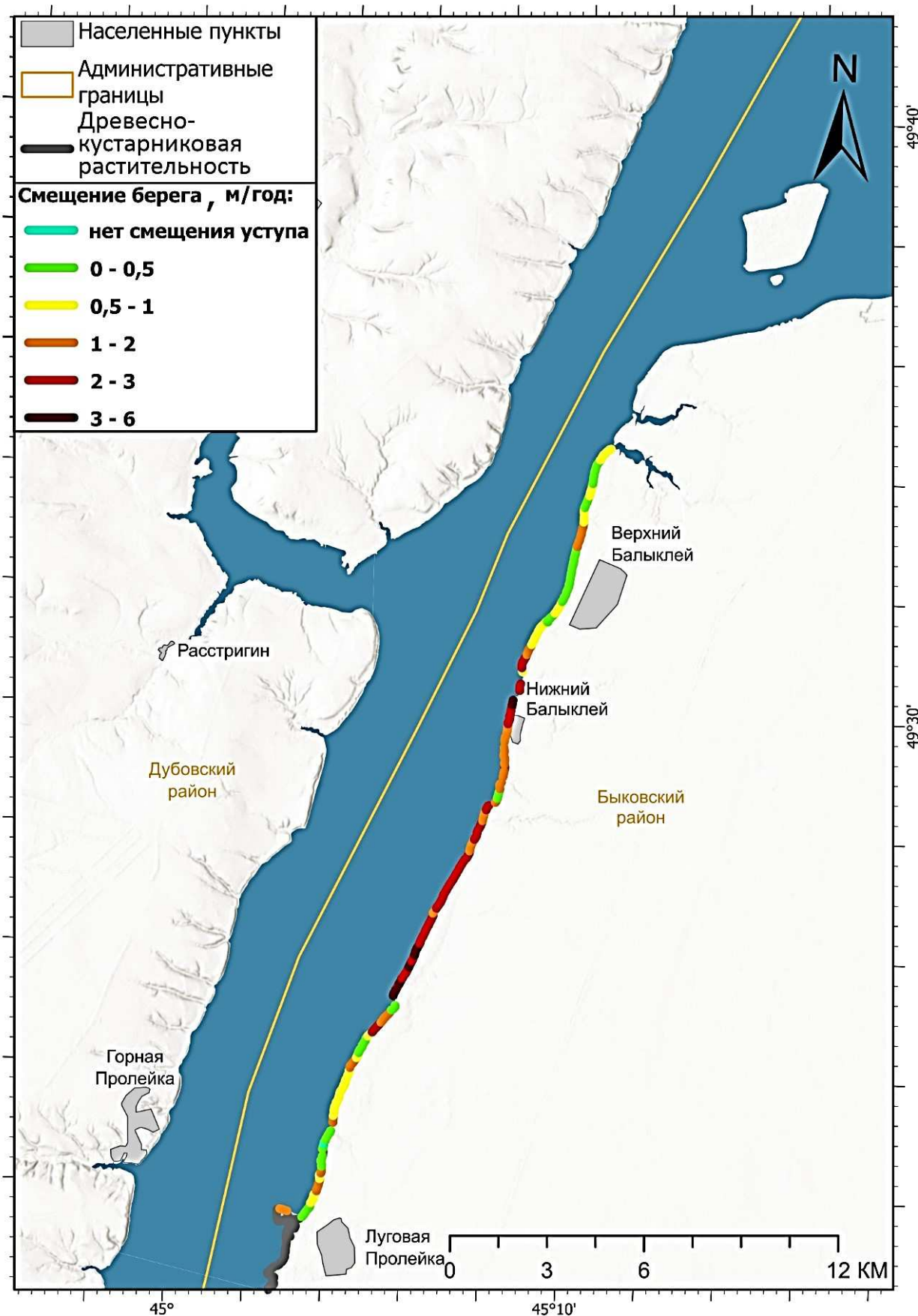


Рис. 2. Скорость смещения берега на левом берегу Волгоградского водохранилища (верхний участок)
/ Fig. 2. The rate of shore displacement on the left bank of the Volgograd Reservoir (upper section)

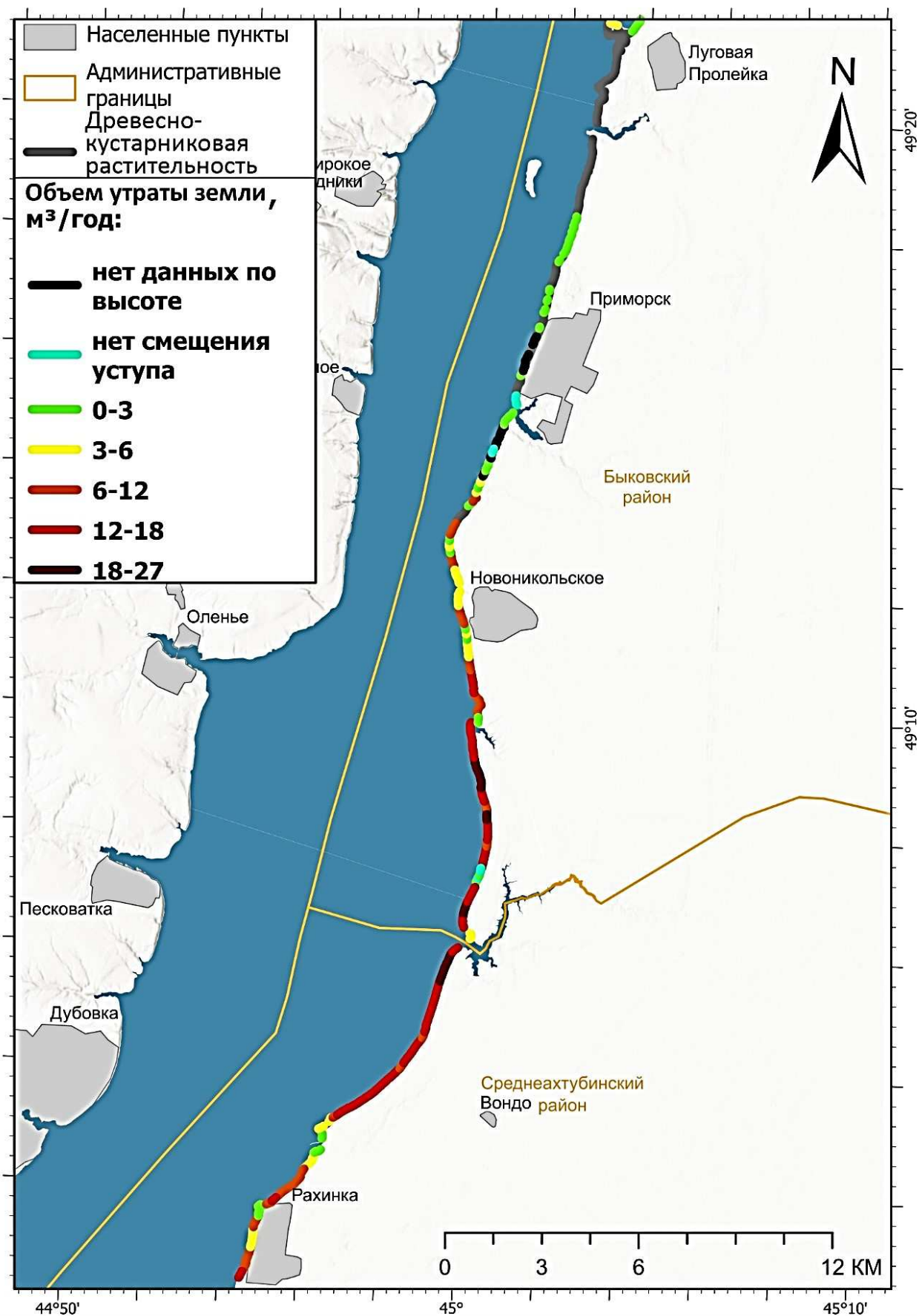


Рис. 3. Скорость утраты объемов земель на левом берегу Волгоградского водохранилища (нижний участок) / Fig. 3. The rate of land loss on the left bank of the Volgograd Reservoir (lower section)

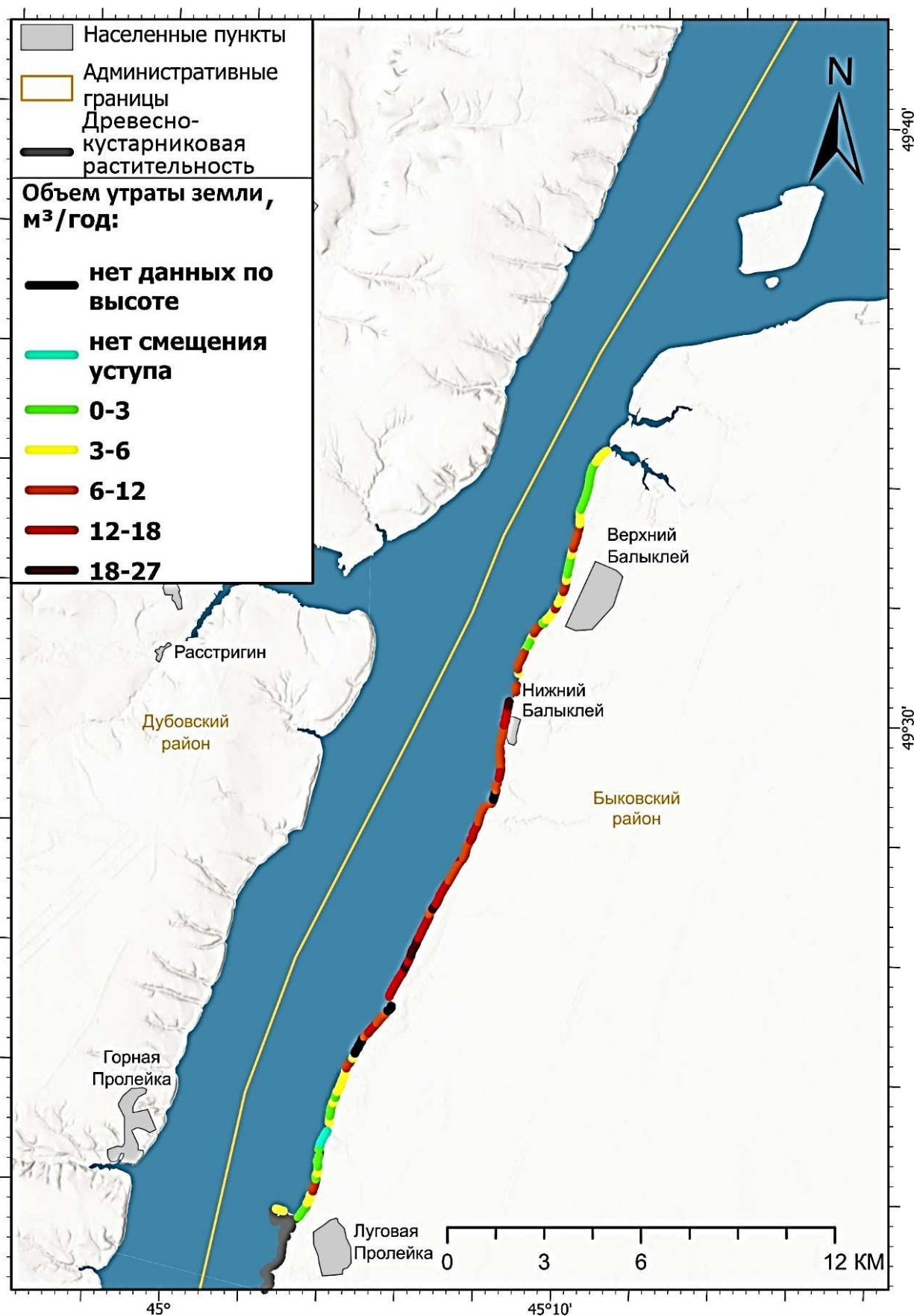


Рис. 4. Скорость утраты объемов земель на левом берегу Волгоградского водохранилища (верхний участок) / Fig. 4. The rate of land loss on the left bank of the Volgograd Reservoir (upper section)

Литологический состав береговых отложений способствует высокой скорости абразионных процессов. При этом участки с естественной защитой (заросли влаголюбивых растений, деревья, кустарники), как правило, менее подвержены абразионным процессам.

Заключение

Высокие показатели смещения берега отмечаются на участке от северной окраины с. Рахинка (1 км на юг от с. Новоникольское). В среднем на данном участке скорость смещения берегов составляет 3 м/год. Высокие показатели наблюдаются в том числе на участке от северного входа в залив, расположенный в 7 км на север от с. Луговая Пролейка и далее на север до с. Нижний Балыклей. В среднем на данном участке скорость смещения берегов составляет 2,1 м/год.

Высокие показатели объемов обрушения грунта отмечаются на участке от северной окраины с. Рахинка до южной окраины с. Новоникольское. Средняя скорость составляет 14 м³/год. Высокие показатели наблюдаются на участке от 6 км на север от с. Луговая Пролейка и далее на север до с. Нижний Балыклей. В среднем на данном участке объемы отвала составляют 13 м³/год. Объем обрушения грунта на обследованном участке за период с 2016 по 2023 г. составил 3 813 760 м³.

В зонах с высокой и средней степенью показателей смещения берегов рекомендуется проведение берегозащитных мероприятий, в особенности возле сёл Рахинка, Нижний Балыклей, Новоникольское.

Применение БПЛА и ГИС-технологий показало свою эффективность как при расчете скоростей абразионных процессов, так и при мониторинге объемов обрушений грунта.

Использование результатов представленных методов может быть полезно как для органов местного самоуправления, так и для других организаций, ведущих хозяйственную и иную деятельность в ВЗ водных объектов.

Список источников

1. Глинка В.В., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. Типизация берегов Волгоградского водохранилища (левый берег) на основе данных беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2 (224-2). С. 11–19. EDN: EBVEVG. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-4-2-11-19>
2. Сапрыгин В.В., Глинка В.В., Скрипка Г.И. Применение беспилотных летательных аппаратов и геоинформационных систем при осуществлении мониторинга берегов и водоохранных зон водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 90–100. EDN: QSWXFC. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_2_6
3. Филиппов О.В. Переформирование берегов Волгоградского водохранилища // Геоморфология. 2012. № 2. С. 34–43. EDN: PALSXH. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2012-2-34-43>
4. Баранова М.С., Кочеткова А.И., Леонтьев Д.А., Брызгалова Е.С., Обьедкова О.А. Периоды отделения и классификация заливов Волгоградского водохранилища по первоначальному объему // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44, № 2. С. 186–197. EDN: GXFSSD. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-2-186-197>
5. Баранова М.С., Кочеткова А.И., Филиппов О.В., Брызгалова Е.С., Фотина О.С., Михайлова Е.А., Курьякин А.А. Морфометрические характеристики устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей и заливов озерного участка Волгоградского водохранилища // Геогр. вестн. 2020. № 1 (52). С. 70–83. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-1-70-83>

References

1. Glinka V.V., Saprygin V.V., Ivlieva O.V., Bepalova L.A. Typification of Volgograd reservoir coasts (left coast) based on data from unmanned aerial vehicles. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(4-2):11-19. (In Russ.). EDN: EBVEVG. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-4-2-11-19>
2. Saprygin V.V., Glinka V.V., Skripka G.I. Use of unmanned aerial vehicles and geoinformation systems in monitoring the coasts and protected water areas of reservoirs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023;(2):90-100. (In Russ.). EDN: QSWXFC. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_2_6

3. Filippov O.V. Reshaping of the Volgograd reservoir coasts. *Geomorphology*. 2012;(2):34-43. (In Russ.). EDN: PALSXH. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2012-2-34-43>

4. Baranova M.S., Kochetkova A.I., Leont'ev D.A., Bryzgalina E.S., Ob'edkova O.A. Periods of separation and classification of the bays of the Volgograd reservoir by the primary volume. *Regional Geosystems*. 2020;44(2):186-197. (In Russ.). EDN: GXFSSD. <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-2-186-197>

5. Baranova M.S., Kochetkova A.I., Filippov O.V., Bryzgalina E.S., Fotina O.S., Mikhailova E.A., Kurykin A.A. Morphometric characteristics of estuarial abrasion-accumulative jumpers and bays of the Volgograd reservoir lake area. *Geographical Bulletin*. 2020;(1):70-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-1-70-83>

Информация об авторах

В.В. Глинка – кандидат географических наук, главный ГИС-специалист РНИИКИиОВР.

В.В. Сапрыгин – кандидат географических наук, руководитель отдела РНИИКИиОВР.

О.В. Ивлиева – доктор географических наук, доцент, профессор кафедры туризма Института туризма, сервиса и креативных индустрий ЮФУ; главный научный сотрудник РНИИКИиОВР.

Л.А. Беспалова – доктор географических наук, профессор кафедры океанологии Института наук о Земле ЮФУ; главный научный сотрудник РНИИКИиОВР.

Information about the authors

V.V. Glinka – Candidate of Science (Geography), Leading GIS Specialist, RRIIUPWR.

V.V. Saprygin – Candidate of Science (Geography), Head of Department, RRIIUPWR.

O.V. Ivlieva – Doctor of Science (Geography), Associate Professor, Professor of the Department of Tourism, Institute of Tourism, Service and Creative Industries, SFedU; Chief Researcher, RRIIUPWR.

L.A. Bespalova – Doctor of Science (Geography), Professor of Department of Oceanology, Institute of Earth Sciences, SFedU; Chief Researcher, RRIIUPWR.

*Статья поступила в редакцию 13.04.2025; одобрена после рецензирования 22.05.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 13.04.2025; approved after reviewing 22.05.2025; accepted for publication 10.07.2025.*

Научная статья

УДК 504.054

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-75-83>

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ПИТЬЕВЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ВОД КАБАРДИНО-БАЛКАРИИ

**Оксана Олеговна Дахова^{1✉}, Геннадий Владимирович Куповых²,
Залина Музариновна Керефова³, Людмила Леонидовна Каирова⁴**

^{1, 4} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик,
Кабардино-Балкарская Республика, Россия

² Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

³ Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

¹ dakhva@rambler.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0008-6623-7461>

² kupovykh@sfnu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9584-6858>

³ zknyaz-kbsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0180-3759>

⁴ s_iriya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4929-330X>

Аннотация. Среди водных ресурсов подземные воды занимают ведущую позицию при использовании их в различных целях водопользования. Одно из ведущих направлений их применения – питьевое назначение, в связи с лучшей по сравнению с поверхностными водами защищенностью от разных видов загрязнения. Изучение состояния подземных вод в целом в настоящее время сохраняет свою актуальность из-за возросшего интереса к ним как туристско-рекреационному объекту и бальнеоресурсу. Кабардино-Балкарская Республика (КБР) занимает первое место по объёму прогнозных ресурсов подземных вод среди регионов федерального округа. Территория КБР характеризуется разнообразием гидроминеральных ресурсов, которые представлены пресными, минеральными и теплоэнергетическими водами. В работе изучена техногенная нагрузка на гидроминеральные ресурсы. Результаты исследования представлены в виде картографического материала. В целом можно сделать заключение об относительно благоприятном состоянии подземных вод на территории КБР, где на 01.01.2022 разведано 81 месторождение и участок месторождений с общими эксплуатационными запасами 1167,8 тыс. м³/сут. Из них для хозяйственно-питьевого и производственно-технического водоснабжения городов и населённых пунктов эксплуатируются 50. Качество подземных вод достаточно высокое, минерализация не превышает 1 г/дм³, содержание нормируемых компонентов в большинстве случаев находится в пределах требований государственных стандартов, по химическому составу преобладают гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные, магниевые-натриево-кальциевые.

Ключевые слова: водозабор, гидроминеральные ресурсы, загрязнение, месторождение, техногенная нагрузка

Для цитирования: Дахова О.О., Куповых Г.В., Керефова З.М., Каирова Л.Л. Современное состояние подземных питьевых и технических вод Кабардино-Балкарии // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 75–83. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-75-83>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

CURRENT CONDITION OF UNDERGROUND DRINKING AND SERVICE WATERS OF KABARDINO-BALKARIA

Oksana O. Dakhova^{1✉}, Gennady V. Kupovykh², Zalina M. Kerefova³, Lyudmila L. Kairova⁴

^{1, 4} Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

² Southern Federal University, Taganrog, Russia

³ High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

© Дахова О.О., Куповых Г.В., Керефова З.М., Каирова Л.Л., 2025

¹ dakhva@rambler.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0008-6623-7461>

² kupovykh@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9584-6858>

³ zknyaz-kbsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0180-3759>

⁴ s_iriya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4929-330X>

Abstract. Among water resources, groundwater occupies a leading position when used for various water use purposes. One of the leading areas of their use is drinking, due to the better protection compared to surface waters from various types of pollution. The study of the state of groundwater in general is currently still relevant due to the increased interest in groundwater as a tourist and recreational facility and balneological resource. The Kabardino-Balkar Republic ranks first in terms of the volume of predicted groundwater resources among the regions of the federal district. The territory of Kabardino-Balkaria is characterized by a variety of hydromineral resources, which are represented by fresh, mineral and thermal energy waters. Technogenic load on hydromineral resources was studied in the study. The results of the study are presented in the form of cartographic material. Based on the results of this work, a conclusion can be made about the relatively favorable state of groundwater in the territory of the Kabardino-Balkarian Republic. On the territory of Kabardino-Balkaria, as of 01.01.2022, 81 deposits and sites of deposits with total exploitable reserves of 1167.8 thousand m³/day have been explored. Of the 81 deposits and sites of deposits, 50 are exploited for domestic and drinking and industrial and technical water supply of cities and settlements. The quality of groundwater is quite high, mineralization does not exceed 1 g/dm³, the content of standardized components in the overwhelming majority of cases is within the requirements of state standards, in terms of chemical composition, hydrocarbonate, sulfate-hydrocarbonate, magnesium-sodium-calcium predominate.

Keywords: water intake, hydromineral resources, pollution, field, development pressure

For citation: Dakhova O.O., Kupovykh G.V., Kerefova Z.M., Kairova L.L. Current Condition of Underground Drinking and Service Waters of Kabardino-Balkaria. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):75-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-75-83>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Россия располагает значительными запасами пресных подземных вод. Их качество обычно выше поверхностных, поэтому они очень широко используются в народном хозяйстве. Подземные воды удовлетворяют около 20 % всей потребности страны в хозяйственно-питьевой воде. Именно ее используют 70 % городских водопроводов. Кабардино-Балкарская Республика (КБР) занимает первое место по объёму прогнозных ресурсов подземных вод среди регионов федерального округа. Территория КБР характеризуется разнообразием гидроминеральных ресурсов, которые представлены пресными, минеральными и теплоэнергетическими водами. Восполнение запасов подземных вод происходит преимущественно в результате инфильтрации поверхностных из многочисленных рек, которые, в свою очередь, получают питание в горной области за счет таяния ледников, снежников, атмосферных осадков и родников [1, 2]. На пресных подземных водах построена вся система питьевого водоснабжения населенных пунктов республики. Поэтому очень важно следить за их состоянием и проводить мониторинг загрязнения и общего состояния.

Доступность качественной и безопасной питьевой воды имеет важнейшее значение для здоровья человека. Основные требования к питьевой воде состоят в том, что она должна быть безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства. Качество питьевой воды должно соответствовать гигиеническим нормативам перед ее поступлением в распределительную сеть, а также в точках водоразбора наружной и внутренней водопроводной сети [3].

Гидрогеологические исследования по изучению пресных и минеральных подземных вод в Кабардино-Балкарской Республике начаты в 30-е гг. XX столетия. В 1935–1936 гг. В.В. Барзилович осуществил изыскания грунтовых пресных вод для водоснабжения Нальчика у места слияния рек Белой и Нальчик. В результате проведенных работ для удовлетворения суточной потребности в воде, составлявшей тогда 15256 м³/сут, им была предложена комбинированная схема водоснабжения города за счет каптажа грунтовых вод и открытого забора воды из р. Нальчик [4].

На территории КБР на 01.01.2022 разведано 81 месторождение и участок месторождений с общими эксплуатационными запасами 1167,8 тыс. м³/сут. Из них для хозяйственно-питьевого и производственно-технического водоснабжения городов и населённых пунктов эксплуатируются 50.

Качество подземных вод достаточно высокое, минерализация не превышает 1 г/дм³, содержание нормируемых компонентов в большинстве случаев находится в пределах требований государственных стандартов, по химическому составу преобладают гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные, магниевые-натриево-кальциевые. Вместе с тем слабозащищенные водоносные горизонты средне-, верхнечетвертичных отложений находятся под угрозой антропогенного загрязнения.

Основной эксплуатационный водоносный комплекс включает в себя водоносные горизонты голоценовых, верхнелепесточных, средне-верхнелепесточных и нижнелепесточных отложений. Он имеет почти повсеместное распространение. Данный комплекс водообилён, воды его хорошего качества, в подавляющем большинстве соответствуют СанПиН «Вода питьевая» [5] и широко используются для водоснабжения городов, населённых пунктов, промышленных предприятий и др.

Воды средне-верхнелепесточных отложений, кроме хозяйственно-питьевого водоснабжения, применяются в промышленно-технических целях. Водоносный комплекс средне-верхнелепесточных-эоплейстоценовых и нижнелепесточных отложений эксплуатируется в водоснабжении Прохладненского, Баксанского, Лескенского, Терского и Майского районов КБР. Учёт отбора пресных подземных вод произведён в соответствии с перечнем промышленных и сельскохозяйственных предприятий, организаций и учреждений, где их использование подлежит государственному учёту.

Территория КБР приурочена к трем гидрогеологическим структурам: Восточно-Предкавказскому артезианскому бассейну (ВПАБ), Большекавказской гидрогеологической складчатой области (БКГСО) и Центрально-Кавказскому гидрогеологическому массиву (ЦКГМ).

Целью настоящего исследования является изучение гидродинамического, гидрохимического и экологического состояния подземных питьевых и технических вод.

Материалы и методы исследования

При написании работы использованы общие и частные методы и подходы к исследованию подземных вод в пределах КБР: аналитический, статистический, сравнительно-геологический, картографический [6].

Информационную базу составили картографические и литературные материалы, а также материалы Территориального фонда геологической информации по КБР.

Результаты исследования и их обсуждение

В ЦКГМ и БКГСО основным водоносным комплексом является неоплейстоценовый, приуроченный к переуглубленным речным долинам [7]. Карта запасов подземных вод и степени их освоения по территории КБР приведена на рис. 1.

Для оценки современного состояния и прогноза изменения подземных вод по 30 пунктам наблюдательной сети скважин выполнены сбор и обработка материалов по гидродинамическим и гидрохимическим режимам на скважинах локальной наблюдательной сети.

По всем скважинам среднемесячные уровни подземных вод в 2022 г. были близки к значениям 2021 г. Повышение или снижение среднемесячных уровней составило ±0,02–0,23 м.

Среднемесячные уровни по большинству скважин в 2022 г. были ниже среднепогодных значений на 0,17–1,38 м. Наблюдения для оценки гидродинамического состояния средне-верхнелепесточного и средне-верхнелепесточного водоносных горизонтов продолжались по трём постам в области питания (верхняя часть Кабардинской равнины). Скважины 760 и 769 находятся вблизи рек Баксан и Черек соответственно, скв. 779 – в междуречье Урвань-Черек.

Амплитуда колебания уровня грунтовых вод была, как и в прошлые годы, наибольшей по скв. 760 (5,7 м) и 769 (4,5 м), где сказывается близость рек, и наименьшей – по скв. 779 (0,85 м). По отношению к 2021 г. произошло его снижение по скв. 779 (–0,19 м) и 760 (–1,40 м). В многолетнем разрезе отмечается повышение уровня на 0,01–2,50 м. При сравнении с первоначальными

наблюдается снижение по скв. 779 (–0,72 м), а по скв. 760 и 769 – повышение на 0,05–0,45 м. Как видно из приведенного анализа, значительных изменений в режиме грунтовых вод не произошло.

Температура подземных вод верхнеэоценового и средне-верхнеэоценового водоносных горизонтов варьировала в пределах 11,0–13,9 °С и также носила сезонный характер: максимальные температуры наблюдались летом, минимальные – осенью. Почти по всем скважинам отмечено повышение температуры подземных вод на 0,2–0,8 °С, кроме скв. 790 (–0,1 °С) и 779 (±0,0 °С).

В 2022 г. по скв. 1 (Белокаменский пост) отмечено снижение пьезометрического уровня на 3,60 м по отношению к 2021 г. Замеры уровня производились манометром при закрытой задвижке на сбросе.

Гидрохимический режим подземных вод водоносного горизонта на протяжении всего цикла наблюдений оставался постоянным, вода относится к гидрокарбонатно-сульфатной кальциево-натриевой, с минерализацией 368–389 мг/л, жёсткость – 4,4 мг-экв. По остальным показателям вода соответствует нормативам, превышений ПДК не отмечено, железо общее – 0,06 мг/л. Карта месторождений подземных вод приведена на рис. 2.

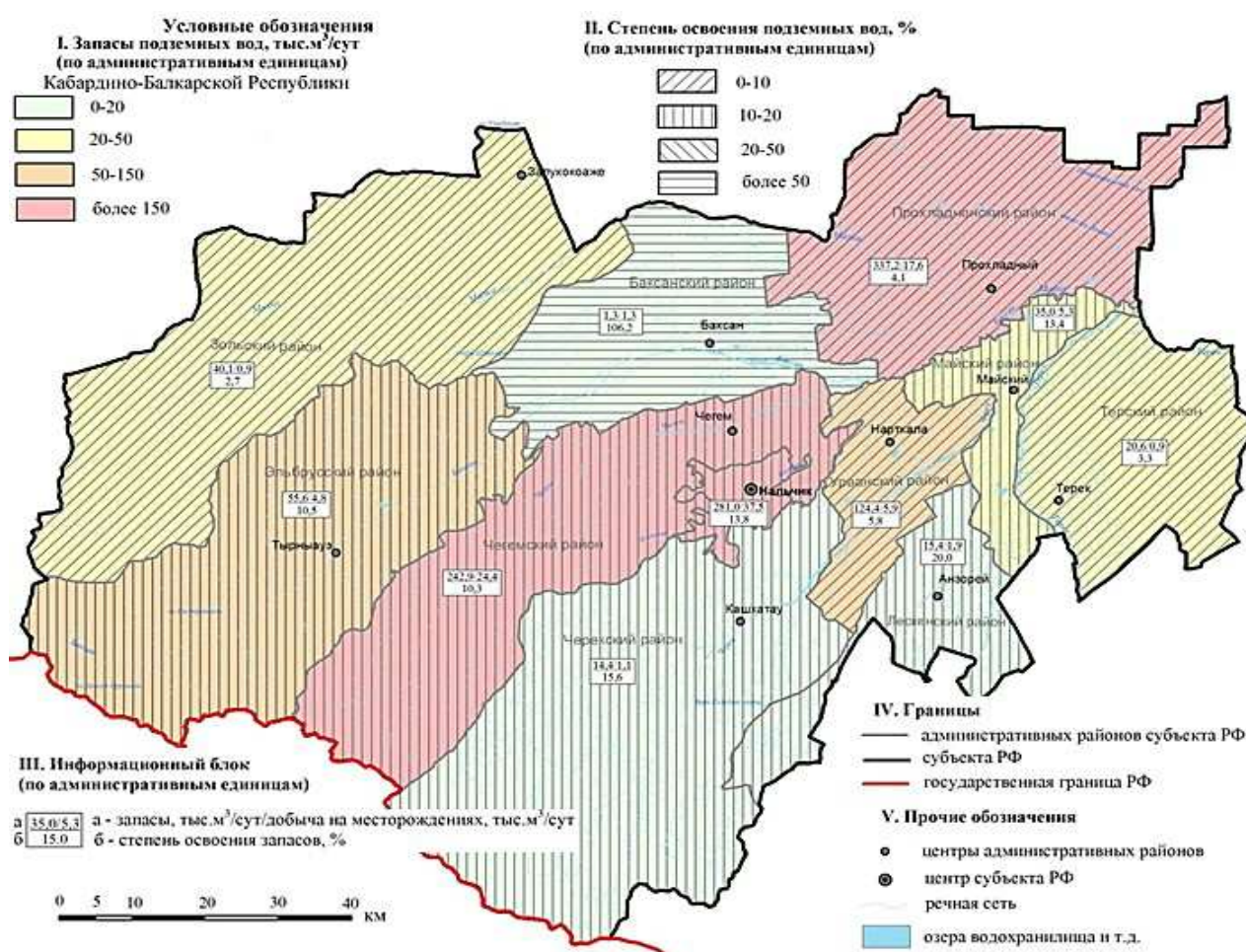


Рис. 1. Карта запасов подземных вод и степени их освоения по территории КБР (на 01.01.2022) (масштаб 1:650000) (составлено авторами по [8, 9]) / Fig. 1. Map of groundwater reserves and degree of their development in Kabardino-Balkaria (for January 1, 2022) (Scale 1: 650,000) (compiled by authors according to data [8, 9])

Состояние подземных вод в районах их интенсивной добычи

Средне-верхнеэоценовый водоносный горизонт. Он эксплуатируется на водозаборах: Майском, Нарткалинском и «Искож» – скв. 41 (рис. 3).

Майский водозабор эксплуатируется с 1985 г., запасы утверждены в сумме 35,0 тыс. м³/сут. Среднемесячные уровни по наблюдательной скв. 572 в 2018 г. составили 0,25 м в 2018 г. (0,07 м – в 2017 г.). Как видно, снижение было незначительным (0,18 м). В среднемноголетнем сравнении

отмечено повышение уровня на 0,35 м. Водозабор работает в установившемся режиме фильтрации, сработки запасов не наблюдается.

Нарткалинский водозабор работает с 1978 г., в 2016 г. запасы утверждены в сумме 15,9 тыс. м³/сут. Среднемесячные уровни 2018 г. в наблюдательных скв. 752 и 753 снизились по отношению к 2017 г. на 0,18–0,43 м. От первоначального уровня снижение составило 1,83 и 3,27 м соответственно.

На водозаборе «Искож» эксплуатируются два водоносных горизонта: средне-верхнеоплейстоценовый (скв. 41) и нижнеоплейстоценовый (скв. 758). Запасы утверждены на средне-верхнеоплейстоценовый водоносный горизонт в сумме 27,3 тыс. м³/сут. Среднемесячный уровень по скв. 41 остался на уровне 2017 г., снижение составило всего 0,09 м.

В многолетнем разрезе среднемесячный уровень незначительно снизился – на 0,28 м. Нижнеоплейстоценовый водоносный горизонт эксплуатируют водозаборы «Искож» (скв. 758), «Шалущка» (скв. 389) и Прохладненский (скв. 754).

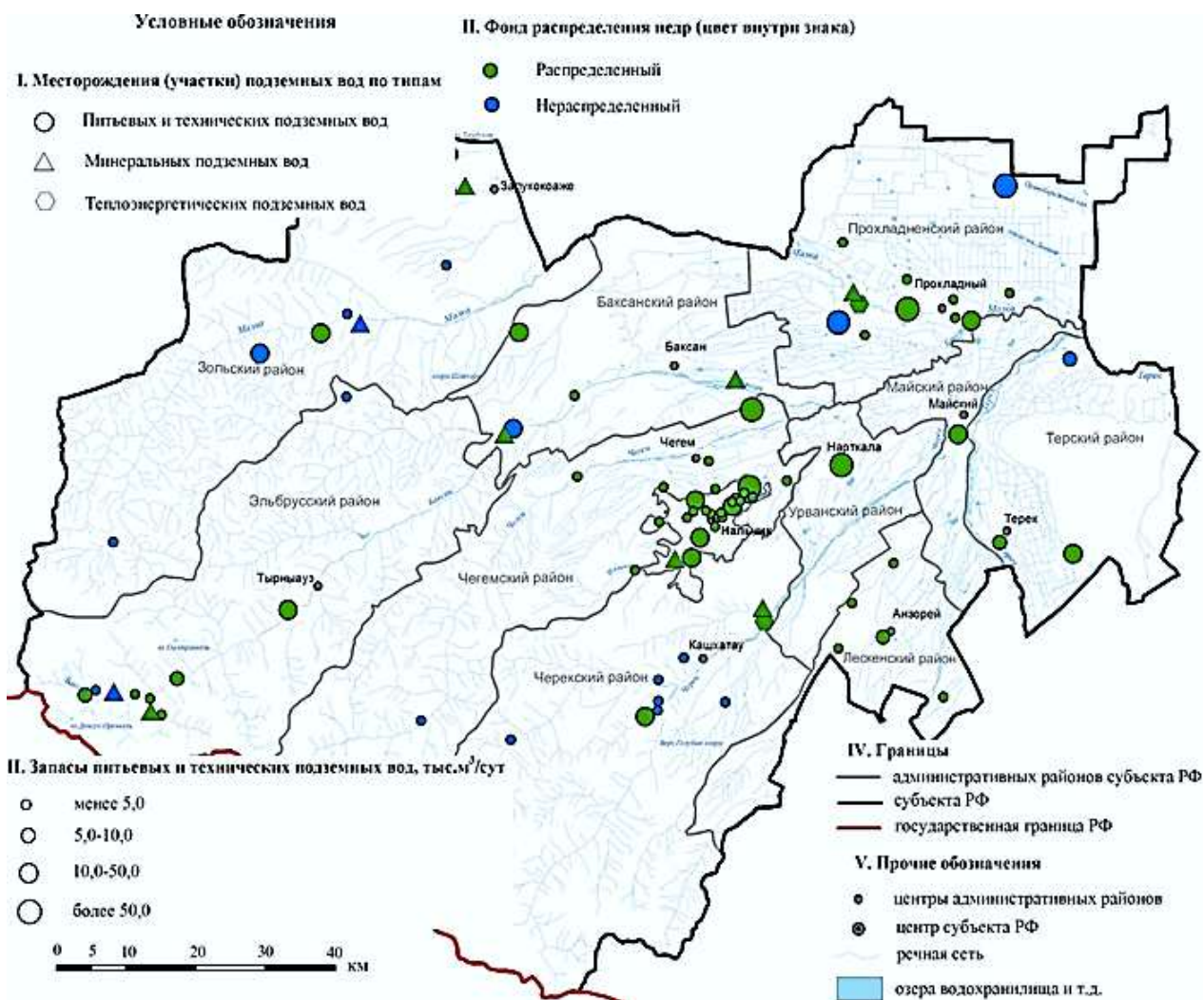


Рис. 2. Карта месторождений подземных вод (масштаб 1:650000) (составлено авторами по данным [8, 9])
 / Fig. 2. Map of groundwater deposits (scale 1:650000) (compiled by authors according to data [8, 9])

Запасы подземных вод на нижнеоплейстоценовый водоносный горизонт по водозабору «Искож» не утверждены. По наблюдательной скв. 758 среднемесячный уровень в 2022 г. понизился всего на 0,04 м по отношению к 2021 г. В многолетнем разрезе по отношению к первоначальному уровню снижение составило 11,36 м. Анализ наблюдений показал, что снижение уровня от первоначального составляет 8,0–12,0 % от допустимого, равного по аналогии с другими участками Нальчикского МПВ 80,0–120,0 м.

Водозабор «Шалушка» эксплуатируется с 1967 г. Запасы подземных вод утверждены в количестве 21,5 тыс. м³/сут. До 1990 г. отбор воды превышал допустимые лимиты. В дальнейшем водоотбор здесь снизился с 30–35 (1990 г.) до 15,236 тыс. м³/сут. За отчётный период отмечено повышение среднемесячного уровня по отношению к 2017 г. на 0,50 м, а по отношению к первоначальному уровню снижение составило 16,52 м (скв. 389). Но это меньше допустимого понижения (30–75 м), поэтому можно сделать вывод, что сработки запасов подземных вод не происходит.

Построенная в 1990 г. карта гидроизогипс свидетельствует, что под влиянием эксплуатации сформировалась депрессионная воронка, вытянувшаяся вдоль линейного ряда эксплуатационных скважин. Максимальная величина снижения уровня с начала эксплуатации и на момент составления карты гидроизогипс в центре водозабора составила 14,87 м, на крайнем северо-восточном фланге линейного ряда – 5,6 м. В отчётном периоде величина снижения уровня в многолетнем разрезе почти не изменилась (16,52 м), в связи с чем карта депрессионных воронок не строилась.

Водозабор Прохладненский работает с 1976 г. Среднемесячный уровень 2022 г. снизился по отношению к 2021 г. на 0,03 (скв. 755) и 0,11 м (скв. 754). При сравнении с первоначальным уровнем понижение составило 1,61 и 1,03 м соответственно (скв. 755 – QIII и скв. 754 – QI).

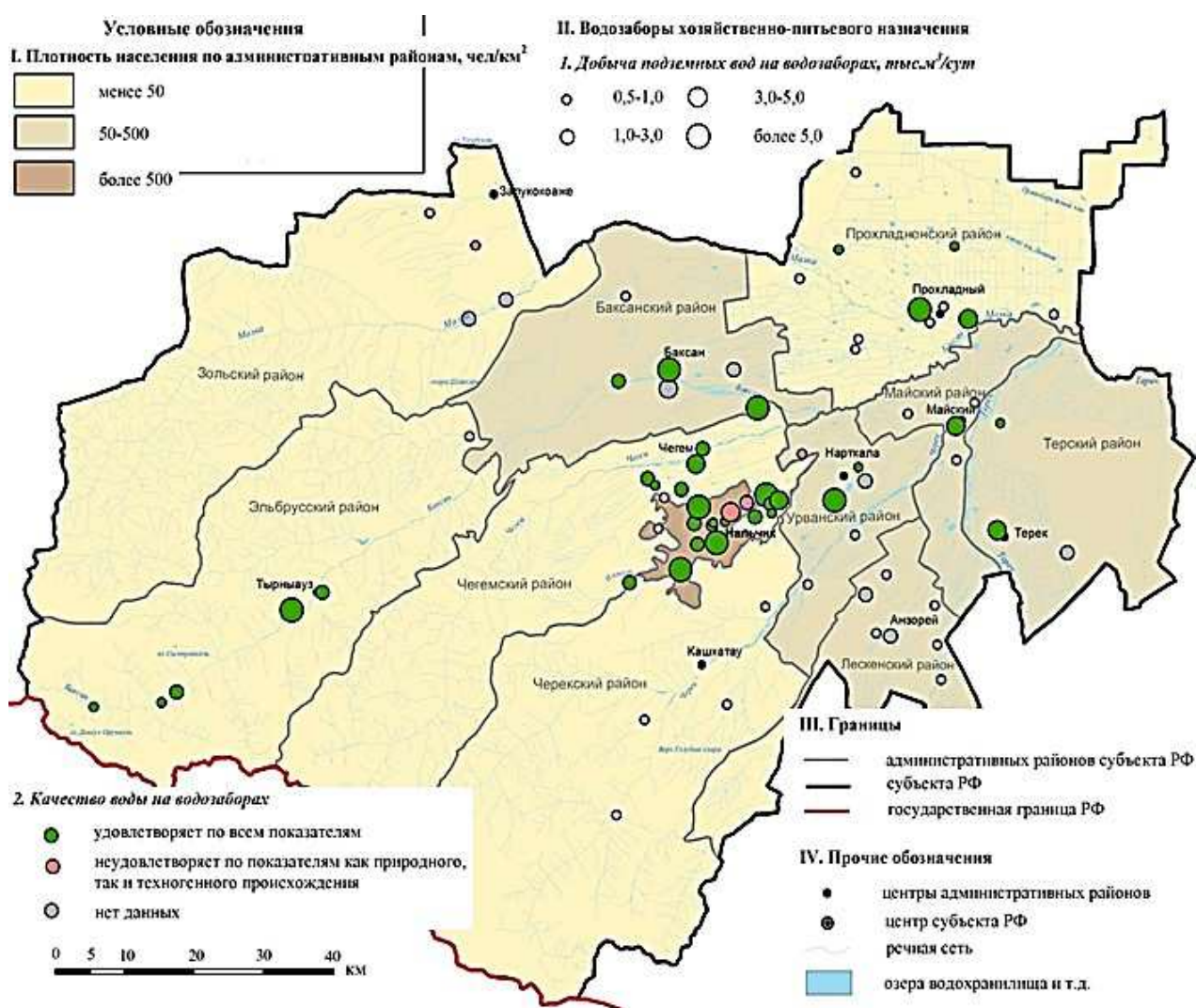


Рис. 3. Карта качества подземных вод (масштаб 1:650000) (составлено авторами по данным [8, 9])
 / Fig. 3. Groundwater quality map (Scale 1: 650,000) (compiled by authors according to data [8, 9])

Водозабор «Кенже» эксплуатируется с 1975 г. Он представлен 8 скважинами, вскрывшими верхнеэоплейстоценовый – голоценовый водоносный горизонт. Водоотбор в 2022 г. составил 0,850 тыс. м³/сут, по сравнению с 2017 г. увеличился на 0,258 м³/сут. Среднегодовой уровень в 2018 г. – 16,54 м (16,80 м – в 2017 г.), повышение уровня составило 0,26 м.

Снижение среднегодовых уровней 2018 г. от среднемноголетних значений составило 2,96 м. По отношению к первоначальному уровню (12,88 м) среднегодовой уровень в 2018 г. (16,54 м) был на 3,66 м ниже. Водозабор работает в стационарном режиме фильтрации.

Водозабор «Кишпек» эксплуатируется для водоснабжения г. Нальчика с 1983 г. Скважинами вскрыт водоносный горизонт средненеоплейстоценовых отложений. Водоотбор в 2022 г. составил 24,542 тыс. м³/сут, что больше, чем в 2021 г., на 0,575 тыс. м³/сут. Среднегодовые уровни в 2022 г. по наблюдательным скв. 308 и 309 были на отметках 8,12 и 21,10 м, а в 2021 г. – 10,89 и 23,78 м соответственно. Повышение среднегодовых уровней составило 2,77 (скв. 308) и 2,68 м (скв. 309).

По отношению к среднемноголетним уровням в 2022 г. по скв. 308 наблюдалось снижение на 1,46 м, по скв. 309 – повышение уровня на 1,13 м. Снижение среднегодового уровня в 2022 г. относительно первоначального составило 2,11 м (скв. 308, центр водозабора). По скв. 309 отмечено повышение среднегодового уровня на 1,27 м. Водозабор работает в установившемся режиме фильтрации.

Водозабор «Парковый» эксплуатируется с 1961 г. Водоносный горизонт – верхненеоплейстоценовый. Водоотбор составил 1,274 тыс. м³/сут (1,307 тыс. м³/сут – в 2017 г.). Среднегодовой уровень 2022 г. был ниже уровня 2021 г. на 0,83 м. Снижение уровня 2022 г. по отношению к среднемноголетнему составило 1,86 м, а к первоначальному – повышение на 0,81 м. Водозабор работает в установившемся режиме фильтрации.

Водозабор «Дубки» эксплуатируется с 1968 г. Эксплуатационные запасы не утверждены. Водоотбор в 2022 г. уменьшился на 1,337 тыс. м³/сут и составил 7,636 тыс. м³/сут. Эксплуатируется нижненеоплейстоценовый водоносный горизонт. Среднегодовой уровень по скв. 303 остался на уровне прошлого года, по скв. 313 снижение составило 2,17 м. В многолетнем разрезе среднегодовые уровни ниже среднемноголетних на 2,44 (скв. 303) и 3,53 м (скв. 313).

Таким образом, все водозаборы работают в установившемся режиме фильтрации. Значительных снижений уровня подземных вод не наблюдается. Температура подземных вод на водозаборах изменялась в пределах 11,5–13,2 °С. В температурном режиме на водозаборах наблюдается постоянство, как и в естественных условиях.

По-прежнему отмечается загрязнение подземных вод на следующих постах:

– Зольский район. По сравнению с 2021 г. повысилось количество нитратов в воде с 11,4 до 56,6 мг/дм³ (1,3 ПДК). Количество кремниевой кислоты увеличилось до 22,6 мг/дм³ – 0,6 ПДК (16,7 мг/дм³ – в 2021 г.). Жёсткость увеличилась до 7,4 мг-экв – 1,1 ПДК (6,95 мг-экв – в 2021 г.). Минерализация была на уровне 2021 г. и составила – 0,51 г/л;

– Герменчикский пост – скв. 011 (верхненеоплейстоценовый ВГ). Отмечено увеличение содержания нитратов до 34,7 мг/дм³ – 0,8 ПДК (5,2 мг/дм³ – в 2021 г.). Минерализация (0,5 г/л) и жёсткость (6,7 мг-экв) остались на уровне предыдущего года. Увеличилось содержание кремниевой кислоты с 26,7 в 2021 г. до 52,4 мг/дм³ в 2022 г. (1,5 ПДК);

– Алтудский пост – скв. 503 (нижненеоплейстоценовый водоносный горизонт). Вода по типу относится к гидрокарбонатно-сульфатной кальциевой, минерализация – 0,313 г/л, pH – 6,1, жесткость – 3,80 мг-экв. Повышенное содержание кремниевой кислоты – 30,6 (0,9ПДК). Остальные компоненты тоже находятся в пределах ПДК.

Гидрохимическая характеристика водных объектов республики определяется воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Территория КБР обладает достаточно развитой речной сетью. Однако ее густота не везде одинакова: больше – в горных районах, меньше – в предгорьях и на равнинах. На равнине недостаток речной сети компенсируется густой сетью ирригационных каналов и искусственных водоемов.

Заключение

В результате исследования изучено современное состояние подземных (питьевых и технических) вод, охарактеризованы водоносные комплексы. Обследование техногенных источников загрязнения охватило предгорную и низкогорную части КБР в пределах Зольского, Баксанского, Чегемского, Урванского (в настоящее время – и Лескенского), Черекского районов и территории

г. Нальчика. Всего было обследовано 73 предприятия, в подавляющем большинстве относящихся к аграрному сектору экономики КБР (молочно-товарные фермы, телятники, животноводческие комплексы, молочные комплексы, птицефабрики, фермерские хозяйства).

Обследованный район является областью питания основных водоносных горизонтов республики: средне-верхнечетвертичного, нижнечетвертичного и апшерон-акчагыльского. В процессе работ установлено, что большинство обследованных предприятий являются потенциальными источниками загрязнения. Только 27 предприятий из 73 находятся в относительно удовлетворительном санитарном состоянии. Большая часть их характеризуется большими скоплениями перегноя и свежего навоза, беспорядочно складированного на больших территориях, отсутствием или неудовлетворительным состоянием навозохранилищ и жижеотстойников, навоз на поля не вывозится или вывозится нерегулярно.

Загрязнение подземных вод (увеличение содержания нитратов и кремниевой кислоты) наблюдается в Зольском районе. Остальные компоненты находятся в пределах ПДК. Водозаборы работают в стационарном режиме фильтрации.

Состояние подземных (питьевых и технических) вод на территории КБР можно оценить как относительно благоприятное по гидродинамическим, гидрохимическим и экологическим характеристикам.

Список источников

1. Каирова Л.Л., Дахова О.О., Али Х.Н.А. Оценка состояния пресных и минеральных подземных вод // Перспектива – 2020 : материалы Междунар. науч. конф. Нальчик: КБГУ, 2020. Т. IV. С. 212–215. EDN: OEBTIA.
2. Каирова Л.Л., Дахова О.О., Али Х.Н.А. Современное состояние термальных подземных вод КБР // Перспектива – 2020 : материалы Междунар. науч. конф. Нальчик: КБГУ, 2020. Т. IV. С. 216–219. EDN: RVKFL.
3. Шагин С.И., Хучунаев Б.М., Кондратьева Н.В., Дахова О.О. Эколого-геохимическая оценка водных ландшафтов Баксанского района Кабардино-Балкарской Республики // Геология, география и глобальная энергия. 2022. № 4 (87). С. 82–88. https://doi.org/10.54398/20776322_2022_4_82
4. Кондратьева Н.В., Дахова О.О., Каирова Л.Л. Изучение гидрогеологических условий Нальчикского месторождения пресных подземных вод // Грозненский естественнонауч. бюл. 2024. Т. 9, № 4 (38). С. 44–52. <https://doi.org/10.25744/genb.2024.83.29.006>
5. СанПин 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. 103 с.
6. Бондаренко С.С., Вартанян Г.С. Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод. М.: Недра, 1986. 479 с.
7. Гвоздецкий Н.А. Физическая география Кавказа. М.: МГУ, 1954. 210 с.
8. Глушакова О.А. Выпуск Государственного учета подземных вод по КБР за 2022 год. Нальчик: Нальчикгеомониторинг, 2022.
9. Прокуронов П.В., Чернов И.И. Состояние комплекта карт геологического содержания Северного Кавказа масштаба 1:1000000. Т. 1, кн. 3: Объяснительная записка к комплекту геоэкологических карт. Ессентуки, 1997. 25 с.

References

1. Kairova L.L., Dakhova O.O., Ali H.N.A. Assessment of Fresh and Mineral Groundwater. *Perspective - 2020*. Materials of the International Scientific Conference. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University; 2020;4:212-215. (In Russ.). EDN: OEBTIA.
2. Kairova L.L., Dakhova O.O., Ali H.N.A. Current state of thermal groundwater of the Kabardino-Balkarian Republic. *Perspective - 2020*. Materials of the International Scientific Conference. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University; 2020;4:216-219. (In Russ.). EDN: RVKFL.
3. Shagin S.I., Khuchunaev B.M., Kondratyeva N.V., Dakhova O.O. Ecological and geochemical assessment of water landscapes of the Baksan region of the Kabardino-Balkarian Republic. *Geology, Geography and Global Energy*. 2022;(4):82-88. (In Russ.). https://doi.org/10.54398/20776322_2022_4_82
4. Kondratyeva N.V., Dakhova O.O., Kairova L.L. Study of the hydrogeological conditions of the Nalchik field of fresh groundwater. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2024;9(4):44-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.25744/genb.2024.83.29.006>

5. SanPin 2.1.4.1074-01. *Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control.* Moscow: Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Russian Ministry of Health; 2002. 103 p. (In Russ.).

6. Bondarenko S.S., Vartanyan G.S. *Methods of studying and assessment of deep groundwater resources.* Moscow: Mineral Resources; 1986. 479 p. (In Russ.).

7. Gvozdetsky N.A. *Physical geography of the Caucasus.* Moscow: Moscow State University; 1954. 210 p. (In Russ.).

8. Glushakova O.A. *Issue of the State Register of Groundwater for the CBD for 2022.* Nalchik: Nalchikgeomonitoring; 2022. (In Russ.).

9. Prokuronov P.V., Chernov I.I. *The state of the set of geological maps of the North Caucasus at a scale of 1:1000000. Vol. 1, Book 3: Explanatory note to the set of geo-ecological maps.* Essentuki, 1997. 25 p. (In Russ.).

Информация об авторах

О.О. Дахова – кандидат географических наук, доцент кафедры биологии, геоэкологии и молекулярно-генетических основ живых систем КБГУ.

Г.В. Куповых – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических основ инженерного образования Инженерно-технологической академии ЮФУ.

З.М. Кереева – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела стихийных явлений ВГИ.

Л.Л. Каирова – аспирант КБГУ.

Information about the authors

O.O. Dakhova – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Biology, Geoecology and Molecular-Genetic Foundations of Living Systems, KBSU.

G.V. Kupovykh – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Academy of Engineering and Technologies, SFedU.

Z.M. Kerefova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Researcher, Department of Natural Phenomena, HMGI.

L.L. Kairova – Postgraduate Student, KBSU.

*Статья поступила в редакцию 09.09.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 09.09.2024; approved after reviewing 15.05.2025; accepted for publication 10.07.2025.*

Научная статья

УДК 631.483:550.424

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-84-100>

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ ПОД ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ КАРАДАГСКОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА

Е.И. Ергина¹, **И.В. Алексаикин²**, **В.В. Дубас³**, **В.А. Литвин⁴**, **Ю.С. Хижняк⁵**

^{1, 2, 3} Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Республика Крым, Россия

^{2, 3, 4, 5} Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Феодосия, Республика Крым, Россия

³ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

¹ ergina65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2684-1540>

² aligor@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8415-6111>

³ victoriadubas.VD@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1194-5950>

⁴ litvin.eko@mail.ru

⁵ hurte97@mail.ru

Аннотация. В рамках эколого-геохимического исследования почв под посадками сосны крымской (*Pinus pallasiana*), распространенных в границах Карадагского природного заповедника, установлены основные качественные и количественные характеристики содержания тяжелых металлов (Ti, Mn, Cr, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr) и металлоидов (As). По результатам полевого определения почвы отнесены к карболитозёмам темногумусовым остаточно-карбонатным на элювии известняка (плотный известняк с глубины 14–24 см). Анализируемые почвы высококарбонатные (рН=8,0–8,1), механический состав – крупнопылевато-тяжелосуглинистый. Основной минералогический состав представлен кальцитом, кварцем, различными гидрослюдами. Количественное содержание рассматриваемых элементов находится в пределах существующих норм ПДК/ОДК и соотносится с кларковыми значениями для почв мира (по А.П. Виноградову), что предопределяет низкий уровень суммарного загрязнения заповедной территории. Исключением являются Ni ($K_k=1,0-1,1$), As ($K_k=1,3$) и Rb ($K_k=101,7-103,3$), для которых характерно накопление по всему профилю. Отношение Rb/Sr, равное в среднем для АУ-горизонта $0,709\pm 0,084$ и для Сса-горизонта $0,759\pm 0,081$, свидетельствует о длительном и непрерывном времени формирования почв. Расположение территории исследования в заповедной зоне с минимально возможным антропогенным влиянием позволяет качественно оценить экологическое состояние на предмет содержания тяжелых металлов в почвах как крайне благополучное.

Ключевые слова: почвы, карболитозёмы, кларк, тяжелые металлы, коэффициент выветривания Rb/Sr, сосна крымская, Карадагский природный заповедник

Для цитирования: Ергина Е.И., Алексаикин И.В., Дубас В.В., Литвин В.А., Хижняк Ю.С. Эколого-геохимическая характеристика содержания тяжелых металлов в почвах под лесными экосистемами Карадагского природного заповедника // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 84–100. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-84-100>

Благодарности: работа выполнена в рамках темы № 125061006869-4 «Пространственно-временная изменчивость углеродного цикла в ландшафтах Юго-Восточного Крыма: комплексный анализ и моделирование».

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE CONTENT OF HEAVY METALS IN SOILS UNDER FOREST ECOSYSTEMS OF THE KARADAG NATURAL RESERVE

E.I. Ergina¹, I.V. Aleksashkin², V.V. Dubas³, V.A. Litvin⁴, Yu.S. Khizhnyak⁵

^{1, 2, 3} Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

^{2, 3, 4, 5} Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS – Branch of Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Feodosia, Republic of Crimea, Russia

^{1, 3} Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

¹ ergina65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2684-1540>

² aligor@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8415-6111>

³ victoriadubas.VD@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1194-5950>

⁴ litvin.eko@mail.ru

⁵ hurte97@mail.ru

Abstract. As part of an ecological and geochemical study of soils under plantings of Crimean pine (*Pinus pallasiana*), distributed within the boundaries of the Karadag Nature Reserve, the main qualitative and quantitative characteristics of the content of heavy metals (Ti, Mn, Cr, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr) and metalloids (As) were established. According to the results of field determination, the soils are classified as dark-humus residual carbonate carbolithozems on limestone eluvium (dense limestone from a depth of 14–24 cm). The analyzed soils are high-carbonate (pH=8.0–8.1), the mechanical composition is coarse-silty-heavy loamy. The main mineralogical composition is represented by calcite, quartz, and various hydromicas. The quantitative content of the elements under consideration is within the existing MPC/APC standards, and correlates with clarke values for soils of the world (according to A.P. Vinogradov), which predetermines a low level of total pollution of the protected area. The exceptions are Ni (Kk=1.0–1.1), As (Kk=1.3) and Rb (Kk=101.7–103.3) which are characterized by accumulation throughout the profile. The Rb/Sr ratio, which is equal on average to 0.709±0.084 for the AU horizon and 0.759±0.081 for the Cca horizon, indicates a long and continuous time of soil formation. The location of the study area in a protected area with the minimum possible anthropogenic influence allows us to qualitatively assess the ecological state for the content of heavy metals in soils as extremely favorable.

Keywords: soils, carbolite soils, clarke, heavy metals, weathering coefficient Rb/Sr, Crimean pine, Karadag Nature Reserve

For citation: Ergina E.I., Aleksashkin I.V., Dubas V.V., Litvin V.A., Khizhnyak Yu.S. Ecological and Geochemical Characteristics of the Content of Heavy Metals in Soils under Forest Ecosystems of the Karadag Natural Reserve. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):84–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-84-100>

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of topic No. 125061006869-4 “Spatiotemporal variability of the carbon cycle in landscapes of South-Eastern Crimea: complex analysis and modeling”.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Изучение вопросов распределения и биогеохимической миграции химических элементов как в отдельных компонентах, так и между природными средами имеет длительную историю. Практические исследования в области геохимии, проводимые с конца XIX в., позволили ввести и развить понятие «кларки» [1–3], определить общие закономерности и региональные особенности изменения концентраций тех или иных химических элементов в горных породах, почвах и растениях [4, 5].

Почвы по своей природе более стабильны по сравнению с другими средами в геохимических ландшафтах, что делает их устойчивыми к различным процессам трансформации. Кроме того, накапливая различные химические элементы и соединения, они становятся основным источником поступления загрязняющих веществ в сопредельные среды. Растительность же в данном случае выступает в качестве биоиндикатора благополучия экологического состояния природной среды, в особенности почвы, с которой она неразрывно связана. Наиболее опасными загрязнителями являются различные металлы и металлоиды, однако следует учитывать необходимость их нахождения в виде микро- и макроэлементов как основных компонентов питания растений. Формы нахождения тяжелых металлов в почвах (свободные и обменные катионы, комплексные соединения, примеси минералов и др.) [6] определяются в зависимости от ряда факторов, в первую очередь от механических и физико-химических параметров почв. Кроме того, тип почвообразования носит ключевое значение в процессах аккумуляции и миграции тяжелых металлов (ТМ) в природных ландшафтах.

В современном мире, где уровень преобразованности природных ландшафтов приобретает рекордно быстрые темпы [7], несомненно, чрезвычайно важно сохранение уникальных природных экосистем, но не менее значимым является определение показателей фоновых концентраций химических элементов для различных сред [8]. Особую актуальность данный вопрос приобретает для Крымского полуострова, характеризующегося значительным ландшафтным разнообразием на относительно малых территориях и, в частности, отличающегося собственной спецификой и особенностями почвенно-климатических условий. Заповедные территории могут выступать в качестве проектных площадей для решения задач мониторинга и последующего нормирования определяемых параметров в рамках геохимических исследований на региональном уровне.

Изучение и нормирование геохимических процессов усложняется отсутствием ориентировочных величин фоновых концентраций химических элементов, которые для Крымского полуострова, в отличие от территории средней полосы России, не установлены. Единственный вариант сравнения установленных в ходе геохимических исследований показателей – законодательно закреплённые величины ПДК/ОДК. Однако в работе [9] подчеркивается некорректность унификации уровней ПДК, что связано с невозможностью нивелирования значимости происхождения, свойств, генетических особенностей собственно почв различных регионов. Эти уровни ОДК, учитывающие данные особенности почв, разработаны для ограниченного количества элементов и соединений. Кроме того, настоящие величины объективно не отражают текущую ситуацию конкретных мест, естественные (фоновые) концентрации химических элементов в большинстве случаев превышают установленные уровни ПДК/ОДК [10, 11]. Тогда для исследований геохимической направленности остается наиболее репрезентативным использование в нормировке установленных кларковых величин.

Эта проблематика обусловила цель данной работы – комплексное геохимическое исследование содержания ТМ в почвах Карадагского природного заповедника как мониторинговой площадки, предопределяющей текущее экологическое состояние в регионе.

Объекты и методы

Территория исследований находится в пределах Карадагского государственного природного заповедника, расположенного в юго-восточном Крыму (рис. 1). Заповедник представляет собой горный массив, сложенный разнообразными вулканическими и осадочными горными породами. Климат заповедника можно определить как переходный от субсредиземноморского, характерного для западной части Южного берега Крыма (ЮБК), к умеренно континентальному умеренно жаркому сухому, характерному для степной части полуострова [12]. Средняя многолетняя годовая температура воздуха Карадага составляет 12,1 °С. Годовая сумма температур выше 10 °С – 3725 °С, что немного ниже величины 4000 °С, принимаемой большинством исследователей [13] в качестве нижней границы умеренно теплого субтропического климата. Среднее количество осадков последнего – 357 мм. Суммарная годовая величина коэффициента увлажнения Высоцкого – Иванова (отношение суммы атмосферных осадков к испаряемости) на Карадаге составляет 0,33 [14].



Рис. 1. Территория исследования: а – местоположение Карадагского природного заповедника в границах Крымского полуострова; б – местоположение участка исследования в границах Карадагского природного заповедника / Fig. 1. Study area: a - location of the Karadag Nature Reserve within the boundaries of the Crimean Peninsula; b - location of the study site within the boundaries of the Karadag Nature Reserve

Растительный покров Карадага характеризуется довольно разнообразной растительностью, что обусловлено комплексом факторов: географическим положением, высотой гор, климатическими и литологическими особенностями. На территории Карадага, обрамляющего восточную границу Крымских гор, проходит граница лесов, распространённых северо-западнее сплошными массивами. На восток распространяются степные массивы. В целом растительность заповедника условно составляет пояса: нижний – пушисто-дубовых лесов и степей и верхний – скальнодубовых лесов. Растительность представлена 4 типами: лесами, степями, томиллярами и саваноидами, образующими в местах контакта переходные группировки. Территориальная и ценогическая структура растительного покрова подвержена антропогенным воздействиям, обусловленным посадками сосны и выпасом овец в различные периоды землепользования [15].

Литолого-геоморфологическое и экологическое разнообразие современных условий и процессов почвообразования формирует высокое почвенное разнообразие Карадага [16]. Основными почвообразующими породами в заповеднике выступают продукты разрушения известняков, глинистых сланцев (аргиллитов), вулканических пород. Мощность почвообразующих пород зависит как от их происхождения, так и от положения в рельефе [12]. Здесь развиты остепненные коричневые щелнистые почвы под шибляками в нижней части гор, бурые лесные на северных макросклонах и седловинах, маломощные черноземы под степной растительностью. Информации о химическом составе почв Карадагского природного заповедника в литературе встречается не так много [17, 18]. Вместе с тем стоит отметить, что почвенному покрову уникальных природных ландшафтов, развитых в предгорных и горных зонах, отведено одно из важнейших значений в поддержании и сохранении биоразнообразия [19, 20].

Объектом исследования в настоящей работе выступают почвы под посадками сосны крымской (*Pinus pallasiana*), произрастающей в пределах юго-западной оконечности Карадагского природного заповедника. Насаждения сосны крымской в пределах заповедника представлены отдельными участками и сплошного распространения не имеют. Наиболее ранние упоминания о проведении здесь лесоустроительных мероприятий датируются 1940-ми гг. и продолжались вплоть до 1970 г. [21]. Стоит отметить, что заповедание территории Карадага впервые было осуществлено лишь в 1979 г.

Отбор проб производился в летний период 2024 г. на возвышенности под посадками сосны крымской в окрестностях Берегового перевала. В качестве проектной площадки (рис. 2) была выбрана территория размером 100 × 100 м. В данных условиях отмечается наименьшая на общем фоне заповедных территорий мощность почвенного профиля, где подстилающие породы – элювий плотных известняковых пород. В верхних частях хребтов и склонов элювий наиболее каме-

нистый, щебнистый, местами – скелетный с малым содержанием мелкозёма [12]. Почвы сформированы под древесной хвойной растительностью, где основной породой является сосна крымская (*Pinus pallasiana*). Вышеуказанные параметры оказывают основополагающее воздействие на формирование морфологического строения заложенных почвенных профилей.

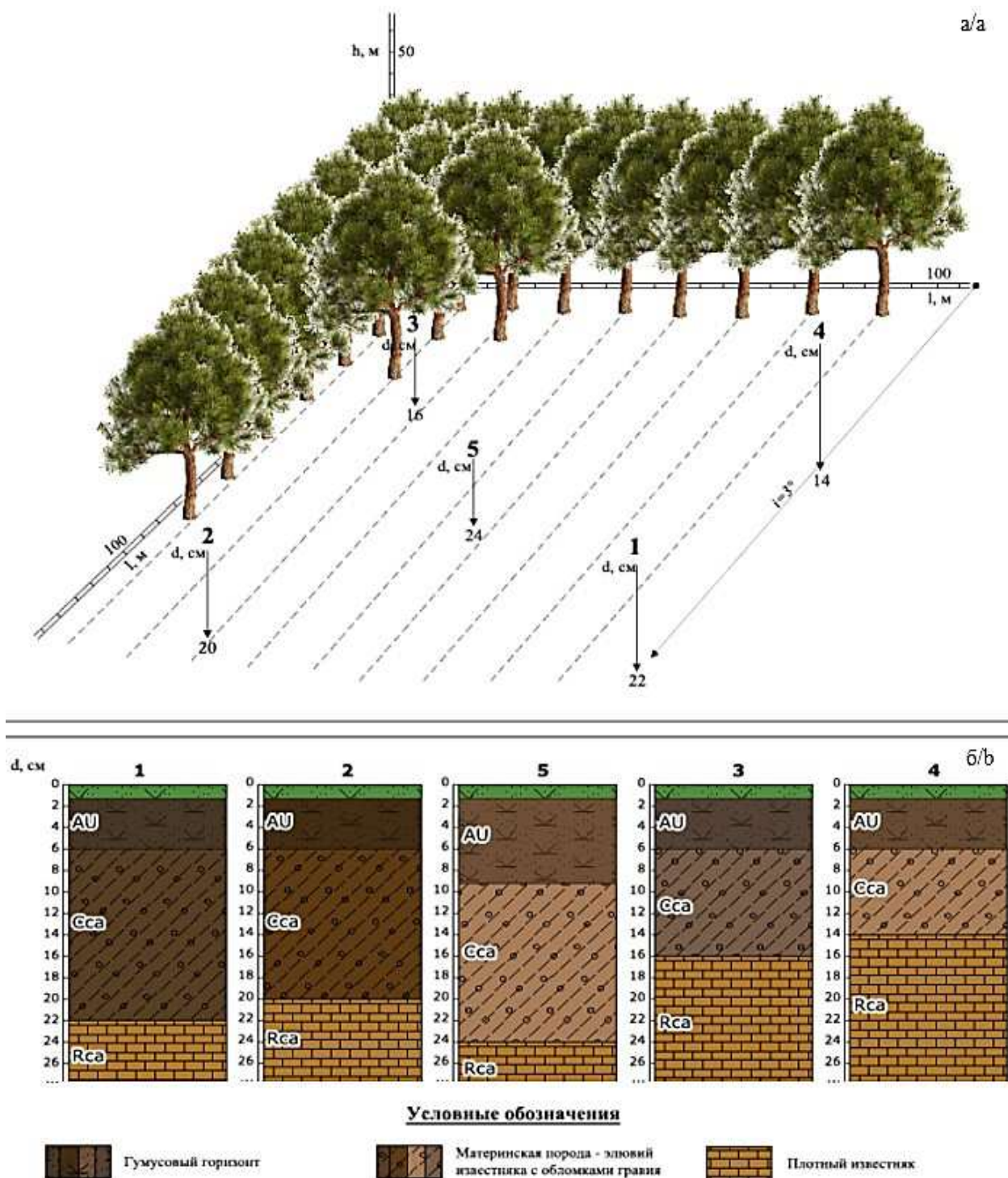


Рис. 2. Модель ключевого участка с указанием мест отбора проб (а), морфологическое строение и особенности почв в границах проектной площадки (Кардагский природный заповедник, Республика Крым) (б): d – мощность почвенного разреза (без учета подстилающей плотной породы), см; h – высота древостоя, м; L – длина сторон ключевого участка, м; i – крутизна уклона местности / Fig. 2. Model of the key area indicating sampling locations (a), morphological structure and soil features within the boundaries of the project site (Karadag Nature Reserve, Republic of Crimea) (b): d - thickness of the soil section (excluding underlying dense rock), cm; h - height of the tree stand, m; L - length of the sides of the key area, m; i - steepness of the terrain slope

Алгоритм отбора проб заключался в закладке почвенного профиля и его описании, в ходе которого выделялись характерные почвенные горизонты. Почвенные профили закладывались согласно общеизвестному методу конверта (ГОСТ 17.4.4.02-84, ГОСТ 17.4.3.01-83). Каждый профиль маркировался латинской буквой Т с последующим присвоением порядкового номера в качестве индекса. Всего заложено 5 почвенных разрезов – Т1 – Т5 соответственно. Затем смешанные пробы массой около 50 г отбирались в зависимости от выделенного почвенного горизонта с примерно одинаковой глубины. Пробы предварительно высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Для ИК-спектрального анализа почвенные образцы измельчались до мелкодисперсного состояния в агатовой ступке. ИК-спектральный анализ полученных проб проводился при комнатной температуре с помощью ИК-Фурье-спектрофотометра Spectrum Two (PerkinElmer, США) в диапазоне 4000–400 см⁻¹. Для интерпретации ИК-спектров неорганических материалов, таких как горные породы и, в частности почвы, целесообразно выделять несколько областей пропускания:

– для О-Н-групп валентные колебания – 3750–2000 см⁻¹, деформационные колебания – 970–660 см⁻¹;

– для С-О-групп валентные колебания – 1450–1410 см⁻¹, деформационные колебания – 880–860 и 750–710 см⁻¹;

– для Si-О-групп валентные колебания – 1250–830 см⁻¹, деформационные колебания – 500–400 см⁻¹ [22].

Органические материалы, к которым могут быть отнесены остатки растительного слоя, обладают более обширными диапазонами колебаний различных соединений. Полосы пропускания в пределах 3000–2500 см⁻¹ отвечают колебаниям С-Н- связей [23], 2600–2500 см⁻¹ соответствуют колебаниям –СООН-групп [19; 24]. В диапазоне 2000–1200 см⁻¹ наблюдаются полосы поглощения, отвечающие колебаниям С-О-, N-О-, N-Н-связей [23]. Наличие, положение и интенсивность полос пропускания в вышеуказанных областях в полной мере позволяют осуществить качественный анализ минералогического состава и структуры почвенных фаз.

Качественное и количественное определение содержания в образцах почв химических элементов производили в порошковых пробах, согласно существующей методике безэталоных измерений массовой доли металлов и оксидов с использованием метода рентгеноспектрального флуоресцентного анализа на рентгеновском спектрометре Supermini 200 (Rigaku, Япония). Полученные полуколичественные результаты, выраженные в массовых процентах, предварительно пересчитывали в мг/кг.

Характеристика содержания химических элементов производилась на основе сравнения с рекомендованными наибольшими величинами среднего содержания в почвах мира по А.П. Виноградову – кларками [1, 25, 26]. Количественно оценить степень превышения или дефицита содержания того или иного химического элемента в анализируемой почве от среднего содержания того же элемента в почвах мира (по А.П. Виноградову) позволяет расчет коэффициента (кларка) концентрации или рассеяния. Коэффициент (кларк) концентрации (Кк) и коэффициент (кларк) рассеивания (Кр) рассчитывали по формулам, согласно МУ 2.1.7.730-99: $K_k = \frac{C_i}{C}$ и/или $K_p = \frac{C}{C_i}$, где С – кларк химического элемента в почвах мира (по А.П. Виноградову), мг/кг; С_і – содержание і-элемента в анализируемой почве, мг/кг.

Рассчитанная величина Кк>1 свидетельствует о накоплении в почвах того или иного элемента, а Кк<1, наоборот, означает уменьшение доли его содержания относительно среднего содержания в почвах мира в целом. Произведенные расчеты сопровождали построением соответствующих графиков – геохимических спектров. Для определения коэффициента накопления ТМ рассчитывали отношение содержания каждого элемента в почвообразующей породе к содержанию его в почве. Коэффициент выветривания Rb/Sr предложен на основании разницы в устойчивости различных минералов к выветриванию, а именно слюд и калиевых полевых шпатов, с которыми в ассоциации находится Rb, и карбонатов, с которыми ассоциирует Sr [27].

Результаты проведенных лабораторных исследований обрабатывались методами математической статистики в программных пакетах STATISTICA и Excel с последующей визуализацией данных посредством Origin.

Результаты и их обсуждение

Общая морфогенетическая характеристика. Все анализируемые почвы в ходе полевого определения и согласно [28] отнесены к карболитозёмам темногомусовым остаточно-карбонатным на элювии известняка (плотный известняк с глубины 14–24 см) с общей формулой профиля: AU – (Cca) – Rca. По рельефу приурочены к возвышенности простой формы, имеющей общий уклон на юго-запад крутизной до 3°. Почвообразующая порода – элювий известняка, подстилаемый плотным известняком с глубины 14–24 см. Почвы слабосмытые, подвержены процессам водной эрозии, мощность гумусовой части почвенного профиля не превышает 10 см с учетом растительной подстилки, образованной на поверхности почвенного разреза, на основании чего можно отнести анализируемые почвы к слаборазвитым. Общая морфогенетическая характеристика анализируемых почв представлена на рис. 2б.

От 10%-й НСІ все анализируемые почвы вскипают с поверхности. Реакция почвенного раствора среднещелочная (рН=8,0–8,1). По результатам полевого обследования механический состав – крупнопылевато-тяжелосуглинистый.

Целевое использование почв в пределах проектной площадки – насаждения сосны крымской (*Pinus pallasiana*). Подлесок представлен различным крымским разнотравьем и злаками. С учетом места расположения проектной площадки (заповедная территория) и представленной морфогенетической характеристики почвы нецелесообразно использовать под пашню и подвергать распашке с последующей посадкой или посевом многолетних культур. Это также связано с близким залеганием карбонатных пород, коротким гумусовым горизонтом и скелетностью, каменистостью почв.

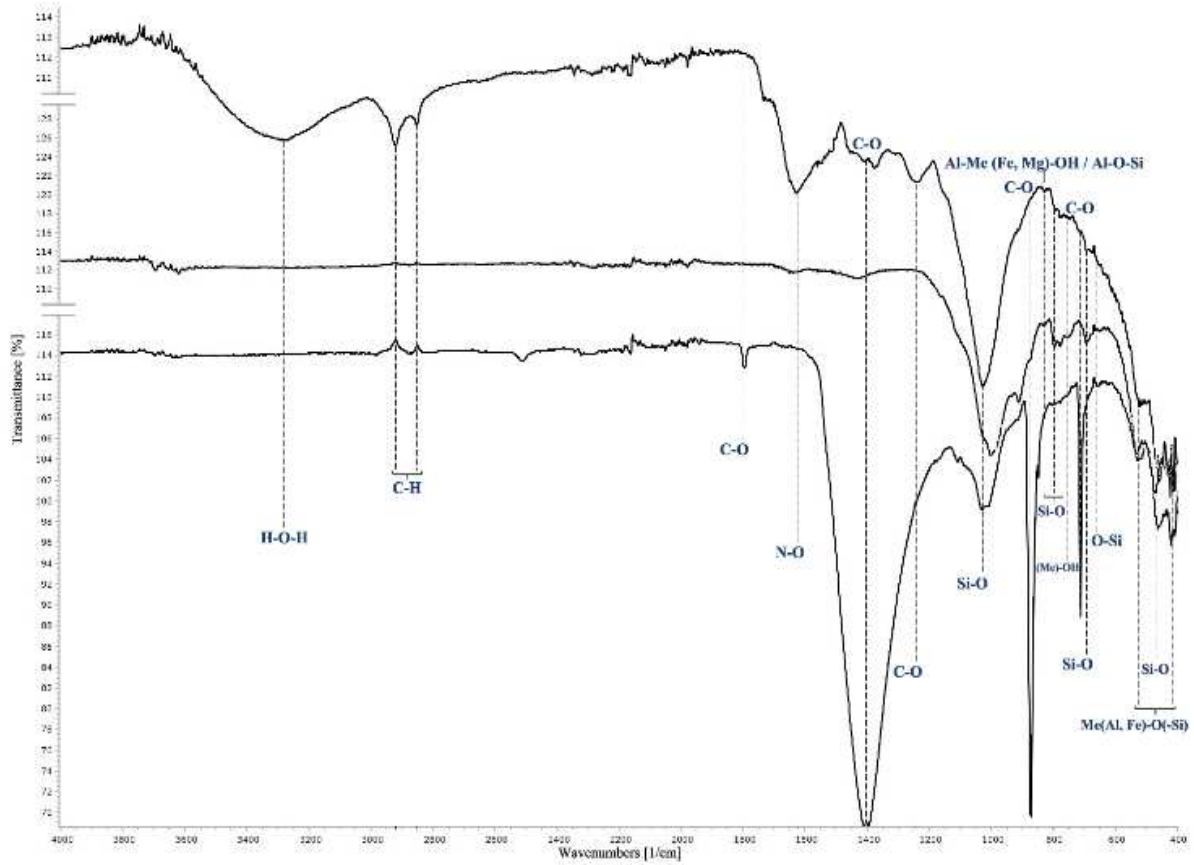
Минералогический состав почв. Согласно полученным и отраженным на ИК-спектрах пикам пропускания для наиболее представительных почвенных горизонтов (рис. 3) характерно наличие минерала группы карбонатов кальция – кальцита, а также группы силикатов – кварца. Вторичные минералы слабо определяются лишь в горизонте С и представлены глинистым минералом, предварительно гидрослюдой.

В пределах почвенного АU-горизонта отчетливо обнаруживаются полосы поглощения, характерные для колебаний различных связей в органических соединениях. Значительное количество полос, проявляющих себя как многочисленные шумы в диапазоне 4000–3500 и 2600–1900 см⁻¹, не может быть достоверно идентифицировано. Полоса пропускания в подстилке разреза 1 при 1039 см⁻¹ относится к колебаниям С-О-связи в полисахаридах, в то время как во всех остальных разрезах полосы около 1000 см⁻¹ относятся к колебаниям Si-О-связей в кремнекислородном каркасе различных минералов группы силикатов. Такая дифференциация при соотношении полос может быть объяснена наличием или отсутствием иных деформационных колебаний, присущих для Si-О-связей, например, в кварце [29]. В данном случае также стоит отметить, что исследуемая часть органического вещества почвы основана на полисахаридах и содержит в большом количестве длинноцепочечные молекулы, что связано с наличием смещенных на общем фоне в высоко-частотную область полос пропускания в области колебания С-Н-связей (при 2924 и 2854 см⁻¹) большей интенсивности.

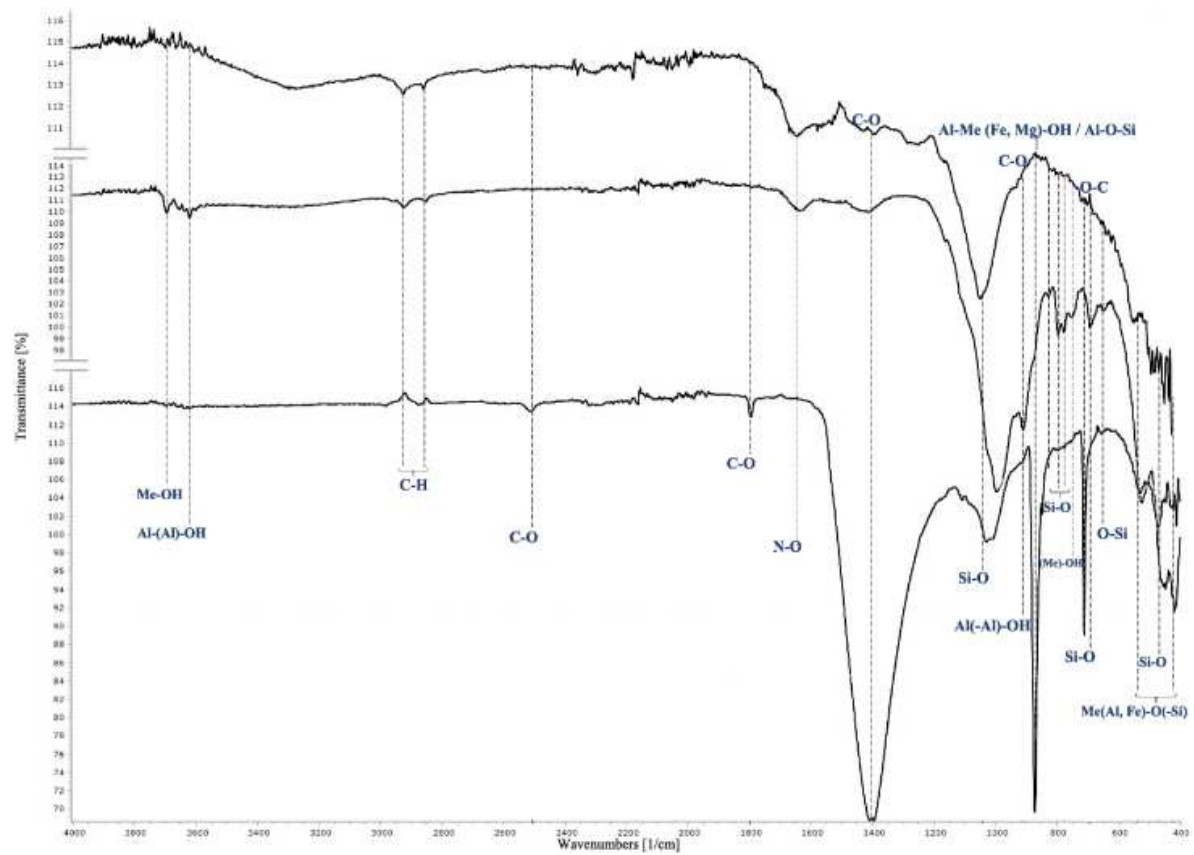
Полосы пропускания в диапазоне 1546–1549 см⁻¹ соответствуют амидным полосам пептидов и белков [23, 30, 31], а различия в интенсивности настоящей полосы напрямую указывают на изменение в сторону снижения содержания белковых материалов в этом горизонте. Значительное количество полос, характерных для органических соединений, в верхнем почвенном горизонте отвечает наличию значительного количества хвойного опада, формирующего местами сплошную подстилку, достигающую мощности в несколько сантиметров.

На ИК-спектрах также отмечается наличие в карбонатной подстилающей породе (известняк) незначительных по интенсивности на фоне полос пропускания, относимых к С-О-связям в структуре СаСО₃, полос пропускания, соответствующих Si-О-связям кремнекислородного каркаса в кварце, что обуславливается его содержанием в качестве примеси. В разрезе 1, 2 и 3 есть органическая составляющая: полосы, отвечающие N-О- и С-Н-связям.

Различия в интенсивности, характерной для С-О-связей в карбонатах кальция, а также полос пропускания, отвечающих органическим соединениям среди представленных ИК-спектров каждого почвенного горизонта, свидетельствуют о возможности существования геохимической миграции с увеличением глубины почвы.



a/a



b/b

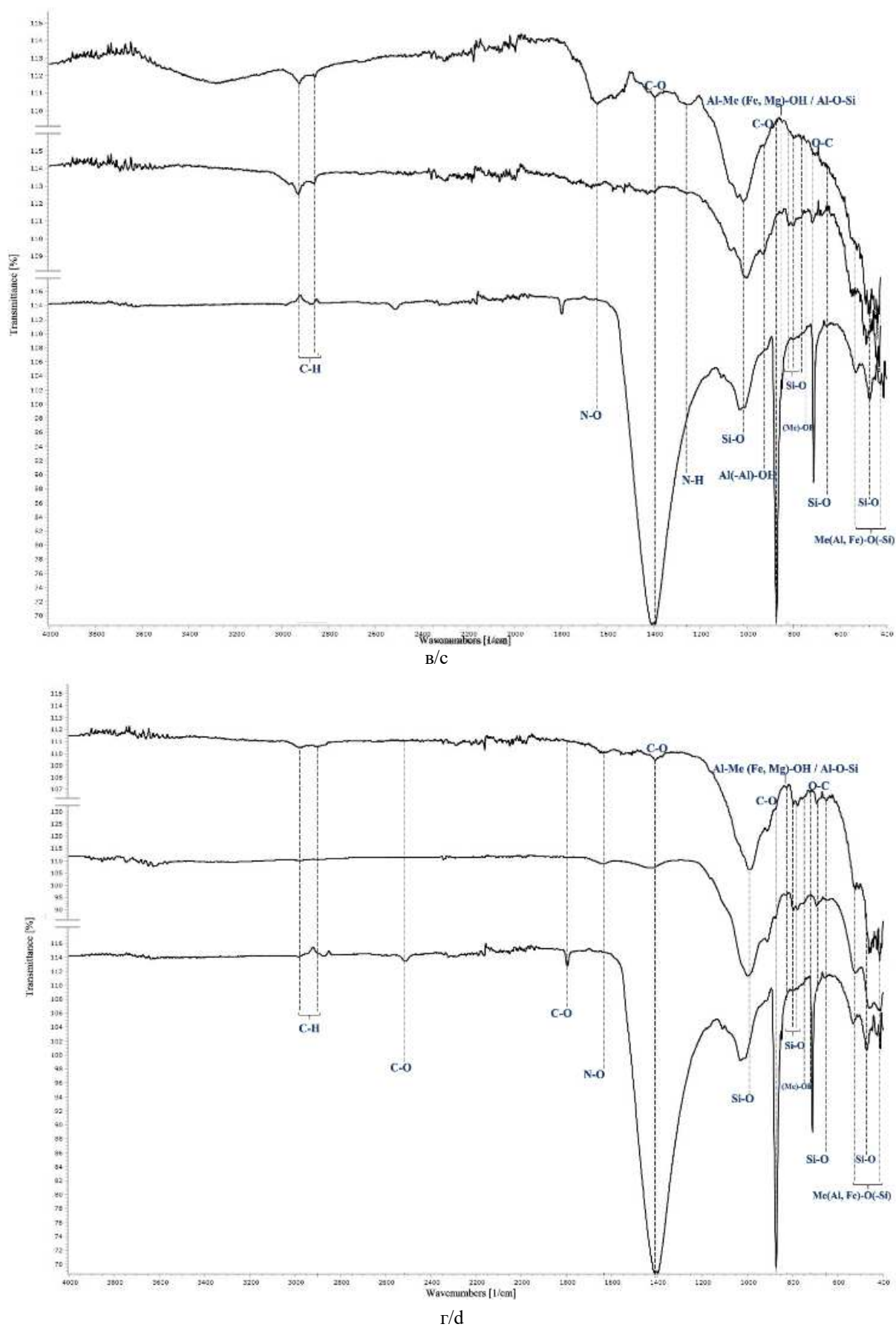


Рис. 3. Качественная ИК-спектральная характеристика почвенных разрезов: а – Т1; б – Т2; в – Т3; г – Т4 / Fig. 3. Qualitative IR spectral characteristics of soil sections: a - T1; b - T2; c - T3; d - T4

Так, например, миграция минералов группы карбоната кальция не только в зависимости от условий рельефа, но и на глубину, доступную при промачивании почв во время дождей, резкое увеличение их содержания на глубине около 15 ± 5 см позволяет говорить об образовании щелочного барьера на границе С- и R-горизонтов. В таком случае следует учитывать вероятность миграции и осаждения сопутствующих анионогенных элементов, обладающих повышенной активностью именно в слабощелочной среде.

Химический элементный состав почв. Валовое содержание ТМ в почвах проектной площадки под посадками сосны крымской (*Pinus pallasiana*) Карадагского природного заповедника находится в пределах существующих нормативных значений (ОДК). Исключение составляют такие элементы, как Ti, Cr, Mn, Rb, Sr и Zr, для которых нормы ОДК не определены. Большинство установленных концентраций металлов также находится в пределах кларковых значений в почвах мира (А.П. Виноградов) (таблица). Все это предопределяет низкий уровень суммарного загрязнения территории, отражающего эффект воздействия группы элементов на окружающую среду.

Коэффициенты вариации для определяемых статистических параметров изменяются в широких пределах, а разница между минимальными и максимальными показателями по содержанию исследуемых металлов в верхнем слое почвы в среднем достигает 1–2 раза. Аналогичная ситуация отражена в [8]: для оценки степени геохимической трансформации почв и установления факта их загрязнения значительный интерес представляет не только абсолютное значение фонового содержания, но и диапазон его варьирования в пределах изучаемой территории. При этом вариабельность фона предопределяется в том числе естественной неоднородностью почвенного покрова в ландшафтах. Визуально распределение ТМ приобретает следующий вид (рис. 4).

В связи со слабой развитостью почвенных профилей и отбором проб с минимально возможных глубин фиксируются лишь незначительные изменения количественных характеристик. Коэффициенты накопления микроэлементов варьируют в пределах от 0 до 1,2 (таблица), ранжированный ряд накопления микроэлементов (в сторону снижения) выглядит следующим образом:

$Ti_{1,082} \rightarrow Mn_{1,013} \rightarrow Ni_{0,999} \rightarrow Sr_{0,993} \rightarrow Rb_{980} \rightarrow Zn_{0,949} \rightarrow Cr_{0,566} \rightarrow Cu_{0,223} \rightarrow As_{0,182} \rightarrow Zr_{0,107}$.

По результатам проведенных расчетов можно утверждать, что содержание большинства микроэлементов в пределах Cca-горизонтов исследуемого ключевого участка от AU-горизонтов отличается несущественно (статистически незначимо). Исключением являются Ti и Mn, для которых характерно явное влияние внешних факторов среды на процессы накопления. Кларки концентрации, рассчитанные относительно среднего содержания ТМ в кларках для почв мира (А.П. Виноградов) (таблица), указывают на аккумуляцию или накопление в гумусовом слое и почвообразующей породе таких металлов, как Ni, As и Rb. Они составляют следующие усредненные ранжированные геохимические ряды:

1) для почв: $Rb/103,3 > As/1,3 > Ni/1,0$;

2) для почвообразующих пород: $Rb/101,7 > As/1,1$.

Для Ti, Cr, Mn, Cu, Zn, Sr и Zr характерно рассеивание – их концентрация меньше кларков в почвах мира. Кларки рассеивания указывают на обедненность почв химическими элементами по отношению к их содержанию в общемировом масштабе. Геохимические спектры, построенные с учетом значений кларков, рассчитанных для каждого из заложенных разрезов, приобретают более детальный вид (рис. 5). В разрезе T3 отмечается накопление меди по всему почвенному профилю, в то время как в усредненном формате для всего исследуемого ключевого участка медь находится в рассеянном виде. Аналогичная ситуация складывается для цинка в разрезах T2 и T5.

Отношение Rb/Sr, равное в среднем для AU-горизонта $0,709 \pm 0,084$ и для Cca-горизонта $0,759 \pm 0,081$, свидетельствует о длительном и непрерывном времени формирования почв на территории Карадага, так как ранее в наших работах доказано, что максимально процессы выветривания в почвах Крыма проявляются через 2000 лет после начала почвообразования и затем закономерно снижаются [33]. Аналогичные выводы представлены и в работе [12].

Поступление химических элементов в почвы определяется как антропогенными факторами, так и природными, что связано с их высвобождением из пород в результате выветривания, а также перемещением в результате миграционных процессов, сопровождающихся последующей трансформацией и (или) аккумуляцией в почвенном профиле. Считается, что общий уровень концентрации рассеянных элементов в почвах степей зависит от их концентрации в почвообразующих породах, которые, в свою очередь, сходны по геохимическому составу с коренными геологическими породами.

Концентрации химических элементов в почвах под посадками сосны крымской (*Pinus pallasiana*) Карадагского природного заповедника, мг/кг / Concentrations of chemical elements in soils under plantings of Crimean pine (*Pinus pallasiana*) of the Karadag Nature Reserve, mg/kg

Статистический параметр	ТМ, мг/кг									
	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Zr
Верхний почвенный горизонт (AU-горизонт (0–6(9) см))										
Хср.±ΔX	311,964± 43,216	5,744 ± 3,129	211,092± 41,731	41,004± 3,260	6,768± 6,053	44,642± 4,218	6,404± 5,464	61,984± 6,689	83,426± 6,119	4,722± 2,593
σ	96,633	6,997	93,314	7,290	13,536	9,431	12,217	14,957	13,682	5,799
Max	443,560	18,300	348,830	50,48	33,840	56,850	30,820	79,990	100,550	12,480
Min	217,240	0,000	121,210	30,620	0,000	30,170	0,000	42,500	60,680	0,000
V, %	30,976	121,821	44,205	17,780	200,000	21,127	190,769	24,131	16,401	122,808
ПДК для почв	–	6	60–1500	4	3	23	–	–	–	–
ОДК для почв	–	–	–	80	132	220	10	–	–	–
Кларк в почвах мира [1, с. 245–260]	4600	200	850	40	20	50	5	0,6 по [32]	300	300
Кк	0,068	0,029	0,248	1,025	0,338	0,893	1,281	103,31	0,278	0,016
Кр	14,745	36,765	4,027	0,975	2,955	1,120	0,781	0,010	3,596	63,532
Почвообразующая порода (Cca-горизонт (6(9)–14(20) см))										
Хср.±ΔX	336,604± 45,589	4,914± 2,395	213,346± 41,504	38,934± 2,442	7,544± 6,748	42,148± 3,616	5,602± 5,011	61,042± 7,165	82,7± 5,777	3,102± 1,725
σ	101,939	5,354	92,806	5,461	15,088	8,085	11,204	16,022	12,919	3,857
Max	467,010	12,660	350,020	47,910	37,720	52,640	28,010	80,010	99,030	8,810
Min	222,660	0,000	119,910	31,090	0,000	30,000	0,000	40,880	61,060	0,000
V, %	30,285	108,962	43,500	14,026	200,000	19,183	200,000	26,247	15,621	124,349
Кларк в почвах мира [1, с. 245–260]	4600	200	850	40	20	50	5	–0,6 по [32]	300	300
Кк	0,073	0,025	0,251	0,973	0,377	0,843	1,120	101,74	0,276	0,010
Кр	13,666	40,700	3,984	1,027	2,651	1,186	0,893	0,010	3,628	96,712
Коэффициент накопления (ССса/CAU)										
Хср.±ΔX	1,082± 0,024	0,566± 0,218	1,013± 0,008	0,999± 0,006	0,223± 0,199	0,949± 0,013	0,182± 0,163	0,980± 0,010	0,993± 0,005	0,107± 0,096
σ	0,053	0,488	0,018	0,013	0,446	0,029	0,364	0,022	0,011	0,215
Max	1,150	1,189	1,041	1,015	1,115	0,994	0,909	1,012	1,006	0,537
Min	1,019	0	0,989	0,976	0	0,915	0	0,962	0,977	0
V, %	4,898	86,243	1,824	1,259	200,000	3,087	200,000	2,197	1,125	200,000
Коэффициент выветривания (Rb/Sr)										
	AU-горизонт					Cca-горизонт				
Хср.±ΔX	0,709±0,084					0,759±0,081				
σ	0,189					0,182				
Max	0,921					0,891				
Min	0,413					0,423				
V, %	26,631					23,994				

Примечание. Кк – кларк концентрации; Кр – кларк рассеяния; Хср. – среднее значение; ±ΔX – ошибка среднего; σ – стандартное отклонение; Max – максимальное значение; Min – минимальное значение; V – коэффициент вариации.

Влияние пород может сглаживать даже различия, обусловленные почвообразовательным процессом, благодаря чему почвы разных типов, но формирующиеся на однотипной породе, оказываются более сходными по количественному содержанию элементов и распределению их по про-

филю, нежели почвы одного генетического типа, развитые на породах различного генезиса. Содержание в них микроэлементов (в том числе ТМ) является одним из показателей экологического состояния почв и почвенного покрова. Учитывая преобладание карбонатных пород как почвообразующих на значительной части горного и предгорного Крыма в целом, можно соотнести данные фонового содержания ТМ в почвообразующих породах карбонатного генезиса Карадага с вышеобозначенной территорией для целей геохимического мониторинга почв.

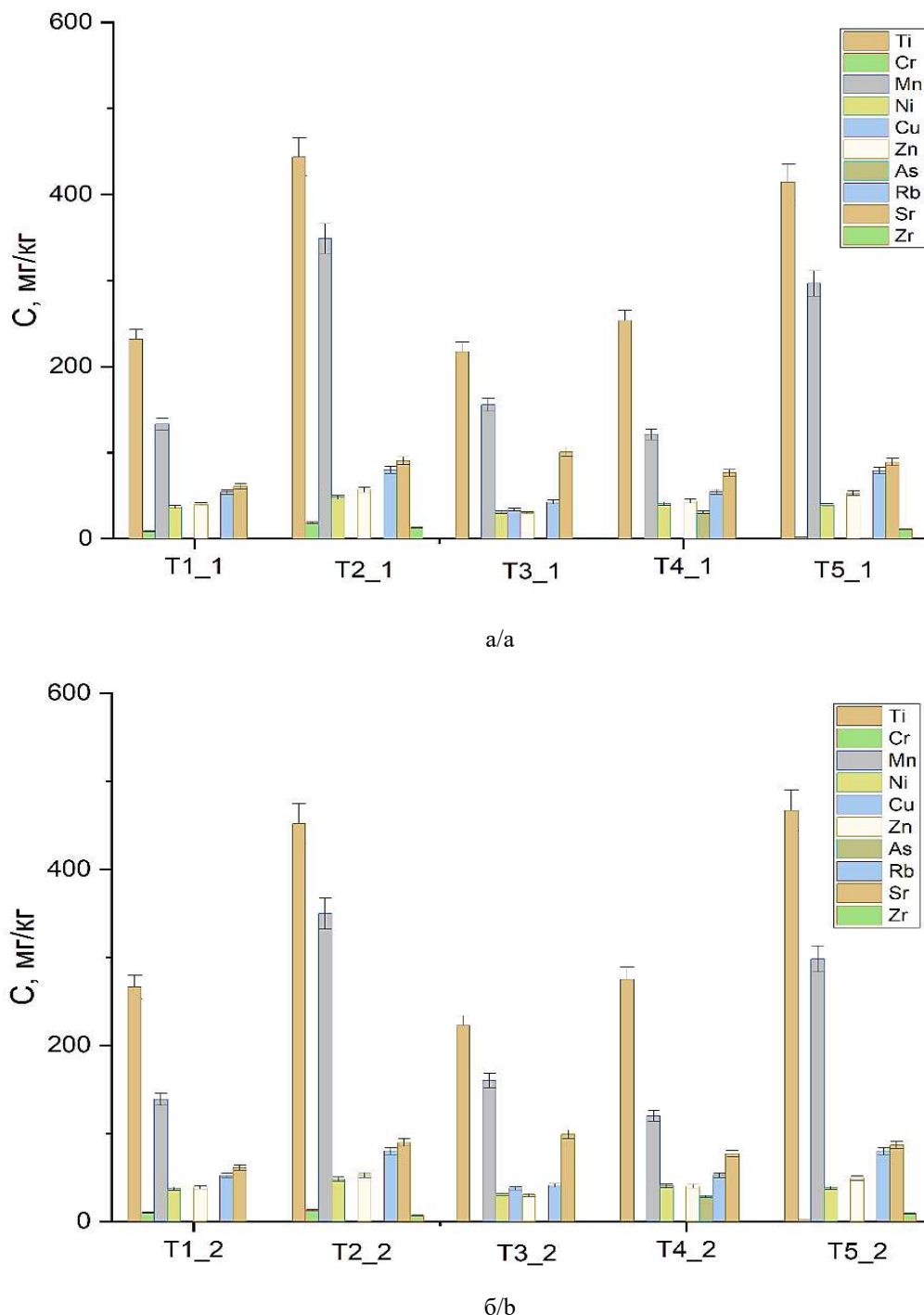


Рис. 4. Характер распределения содержания валовых концентраций ТМ в почвах под посадками сосны крымской (*Pinus pallasiana*) Карадагского природного заповедника: а – АУ-горизонт; б – Сса-горизонт / Fig. 4. The nature of the distribution of the content of gross concentrations of heavy metals in soils under plantings of Crimean pine (*Pinus pallasiana*) of the Karadag Nature Reserve: a - AU horizon; b - Cca horizon

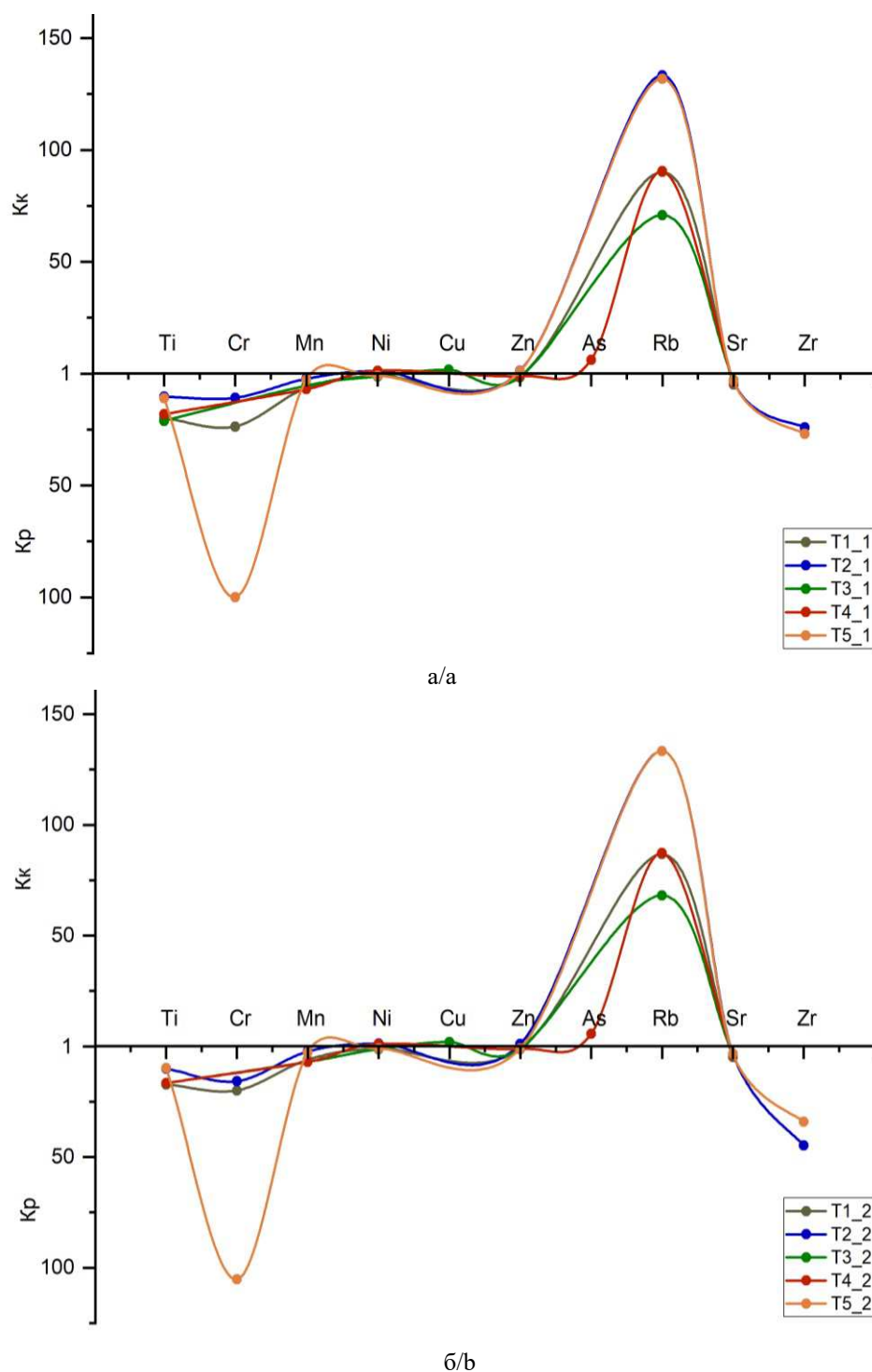


Рис. 5. Геохимические спектры почв в зависимости от глубины (для гумусового АУ-горизонта (а), для горизонта Сса (б) под посадками сосны крымской (*Pinus pallasiana*) Карадагского природного заповедника) / Fig. 5. Geochemical spectra of soils depending on depth (for the humus AU horizon (a), for the Cca horizon (b) under plantings of Crimean pine (*Pinus pallasiana*) of the Karadag Nature Reserve)

Относительно невысокие валовые концентрации металлов из числа тяжелых элементов в большинстве своем объясняются прежде всего нахождением в буферной заповедной зоне с отсутствующей в ее пределах значительной хозяйственной и тем более промышленной деятельностью, что значительно минимизирует влияние антропогенной составляющей на вовлечение ТМ в геохимические круговороты в природной среде. Это позволяет качественно оценить экологическое состояние рассматриваемой территории на предмет содержания ТМ в почвах как крайне благополучное.

Заключение

По результатам проведенных исследований установлены основные морфогенетические особенности почв, формирующихся под посадками сосны крымской (*Pinus pallasiana*) в границах Карадагского природного заповедника. Посадки носят искусственный характер, однако положение в буферной зоне заповедных территорий максимально минимизирует антропогенное влияние. В подтверждение тому – количественные показатели, в большинстве своем не превышающие существующие нормы ОДК и кларковые значения для почв мира. Специфической чертой рассматриваемых почв является неразвитость почвенного профиля, критически малая мощность разреза, в особенности верхнего гумусового горизонта. Почвы высококарбонатные, вскипают с поверхности, уровень pH варьирует в пределах значений 8,6–8,9.

Минералогический состав рассмотренных почвенных разрезов характеризуется преобладающим содержанием карбонатных (кальцит) и силикатных (кварц, глинистые минералы) пород, что обусловлено естественными процессами поступления и распределения Ca и Si в почвах и за их пределами. Непосредственно это влияет на уровень pH и последующую миграционную способность ТМ.

Элементный состав отличается незначительной сменой концентраций по профилю, что связано в первую очередь с маломощностью почвенных профилей. Исключения составляют Cr, Cu, As и Zr, которые качественно определяются не во всех образцах, представленных к исследованию. В среднем коэффициент вариации составляет 14,3–200,0 для элементов, содержащихся в гумусовом АU-горизонте и в почвообразующей породе (С-горизонт). Коэффициент накопления химических элементов в гумусовом АU-горизонте по отношению к почвообразующей породе (Cca-горизонт) свидетельствует о накоплении металлов, за исключением Ti и Mn, на накопление которых значительное влияние оказывает содержание элементов в минералах и горных породах нижележащих горизонтов. Построенные геохимические спектры, напротив, отражают накопление таких металлов, как Cu, As, Rb, Sr и Zr, значения для которых рассчитывались в отношении содержания в кларках для почв мира (А.П. Виноградов). Отношение Rb/Sr, равное в среднем для АU-горизонта $0,709 \pm 0,084$ и для Cca-горизонта $0,759 \pm 0,081$, свидетельствует о длительном и непрерывном времени формирования почв на территории Карадагского природного заповедника.

Все это предопределяет низкий уровень суммарного загрязнения территории, отражающего эффект воздействия группы элементов на окружающую среду. Полученные данные могут быть рассмотрены и использованы в качестве значений регионального фонового содержания химических элементов в почвах.

Список источников

1. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 234 с.
2. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2015. № 2. С. 7–17. EDN: UCGNHL.
3. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59, № 7. P. 1217–1232. EDN: VJEBOP. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
4. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 326 с.
5. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
6. Казакова Н.А. Загрязнение почвы тяжелыми металлами // Вестник Ульяновской гос. с/х акад. 2009. № 1. С. 29–31. EDN: MUEXPP.
7. Тетиор А.Н. Пределы изменений компонентов ландшафтов Земли // Sci. of Europe. 2020. № 55-3. С. 34–45. EDN: ОАОЕХВ.
8. Дабахов М.В., Дабахова Е.В. Геохимическая характеристика сельскохозяйственных земель северо-востока Приволжской возвышенности // Агротех. вестн. 2024. № 5. С. 54–62. EDN: BHGTBL. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-5-010>
9. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высшая школа, 2002. 334 с.
10. Лисецкий Ф.Н., Зеленская Е.Я. Различия в содержании тяжелых металлов в почвах южного берега Крыма (пространственно-временной анализ) // Экосистемы. 2023. № 34. С. 81–91. EDN: OREEJI.

11. Чернова О.В., Бекецкая О.В. Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1102–1113. EDN: PEAOLF. <https://doi.org/10.1134/S106422931109002X>
12. Калинин П.И., Алексеев А.О. Геохимические характеристики погребенных голоценовых почв степей Приволжской возвышенности // Вестн. ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2008. № 1. С. 9–15. EDN: JQYVBT.
13. Гаркуша Л.Я., Багрова Л.А., Позаченюк Е.А. Разнообразие ландшафтов Крыма со средиземноморскими элементами флоры // Учен. зап. ТНУ им. В.И. Вернадского. Серия: География, геология. 2012. Т. 25 (64), № 2. С. 36–47.
14. Экология Крыма / под ред. Н.В. Багрова и В.А. Бокова. Симферополь: Крымское уч.-пед. гос. изд-во, 2003. 360 с.
15. Дыдух Я.П., Вакаренко Л.П., Шеляг-Сосонко Ю.Р. Геоботаническая карта Карадага (Крым) как основа для изучения антропогенных сукцессий растительности // Геобот. картографирование. 1981. № 1981. С. 25–33. EDN: HSNANW.
16. Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Табуницкий В.А., Петлюкова Е.А. Почвенное разнообразие территории Крымского полуострова // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 1 (217). С. 61–69. EDN: WIRNSC. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-61-69>
17. Дрыгваль П.В., Дрыгваль А.В., Лебедев Я.О., Горбунов Р.В., Станис Е.В., Фам К.Н. Распределение и миграция химических элементов в почвах хребта Магнитного (ГПЗ «Карадагский») // Тр. Карадагской науч. станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2021. Вып. 4 (20). С. 43–53. EDN: TLGJLM. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.20.06>
18. Дрыгваль П.В., Дрыгваль А.В., Станис Е.В., Лебедев Я.О., Горбунов Р.В., Приймак А.С., Горбунова Т.Ю., Бобко Н.И., Ляпунов С.М., Ергина Е.И. Пространственная дифференциация и геохимические особенности почвенного покрова Государственного природного заповедника «Карадагский» // Почвы – стратегический ресурс России: тез. докл. VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. М.; Сыктывкар, 2021. С. 625–627. EDN: RBGVMW.
19. Molina-Venegas R., Aparicio A., Lavergne S., Arroyo J. How soil and elevation shape local plant biodiversity in a Mediterranean hotspot // Biodiversity and Conservation. 2016. Vol. 25, iss. 6. P. 1133–1149. EDN: WSORHV. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1113-y>
20. Venevsky S., Venevskaia I. Hierarchical systematic conservation planning at the national level: identifying national biodiversity hotspots using abiotic factors in Russia // Biological Conservation. 2005. Vol. 124, № 2. P. 235–251. EDN: LJABWV. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.01.036>
21. Саркина И.С., Миронова Л.П. Роль лесокультуры в формировании микобиоты // 100 лет Карадагской науч. станции им. Т.И. Вяземского. Симферополь: Н. Орианда, 2015. С. 241–253. EDN: XEVCZT.
22. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1976. 175 с.
23. Baes A.U., Bloom P.R. Diffuse Reflectance and transmission Fourier Transform Infrared (DRIFT) spectroscopy of humic and fulvic acids // Soil Sci Soc. Am. J. 1989. Vol. 53, № 3. P. 695–700. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300030008x>
24. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 55 с.
25. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. Вып. 7. С. 555–571. EDN: SIZCQF.
26. Добровольский В.В. Геохимия почв и ландшафтов // Избр. тр. М.: Науч. мир, 2009. Т. 2. 752 с.
27. Gallet S., Bor-ming J., Masayuki T. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications // Chem. Geol. 1996. Vol. 133, № 1–4. P. 67–88. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00070-8)
28. Шишов Л.А., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с. EDN: PTEEQE.
29. Robinson L., Robertson J. In Situ FTIR Analysis of Soils for Forensic Applications // Spectroscopy Supplements. 2015. Vol. 30, iss. 8. P. 22–30.
30. Spaccini R., Piccolo A., Haberhauer G., Stemmer M., Gerzabek M.H. Decomposition of maize straw in different European soils as revealed by DRIFT spectra of soil particle fractions // Geoderma. 2001. Vol. 99, № 3–4. P. 245–260. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00073-2)
31. Williams D.J.-I., Fleming I. Spectroscopic methods in organic chemistry. London: McGraw-Hill, 1966. 222 p.
32. Чертко Н.К., Чертко Э.Н. Геохимия и экология химических элементов. Минск: Изд. центр БГУ, 2008. 140 с. EDN: QKHJIT.
33. Ергина Е.И. Пространственно-временные закономерности процессов современного почвообразования на Крымском полуострове. Симферополь: Ариал, 2017. 220 с. EDN: YNYYNX.

References

1. Vinogradov A.P. *Geochemistry of rare and trace elements in soils*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1957. 237 p. (In Russ.).
2. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*. 2015;(2):7-17. (In Russ.). EDN: UCGNHL.
3. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1995;59(7):1217-1232. EDN: VJEBOP. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
4. Glazovskaya M.A. *Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR*. Moscow: Higher School; 1988. 326 p. (In Russ.).
5. Dobrovolsky V.V. *Geography of microelements. Global dispersion*. Moscow: Thought; 1983. 272 p. (In Russ.).
6. Kazakova N.A. Soil pollution with heavy metals. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2009;(1):29-31. (In Russ.). EDN: MUEXPP.
7. Tetior A. N. Limits of changes in land landscapes components. *Sci. of Europe*. 2020;55-3:34-45. (In Russ.). EDN: OAOEXB.
8. Dabakhov M.V., Dabakhova E.V. Geochemical characteristics of agricultural lands in the north-east Volga upland. *Agrochem. Bulletin*. 2024;(5):54-62. (In Russ.). EDN: BHGTBL. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-5-010>
9. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Lozanovskaya I.N. *Ecology and protection of the biosphere during chemical pollution*. Moscow: Higher School; 2002. 334 p. (In Russ.).
10. Lisetskii F.N., Zelenskaya E.Ya. Differences in the content of heavy metals in the soils of the southern coast of Crimea (spatio-temporal analysis). *Ecosystems*. 2023;(34):81-91. (In Russ.). EDN: OREEJI.
11. Chernova O.V., Beketskaya O.V. Permissible and background concentrations of pollutants in environmental regulation (heavy metals and other chemical elements). *Eurasian Soil Science*. 2011;44(9):1008-1017. EDN: PEAOLF. <https://doi.org/10.1134/S106422931109002X>
12. Kalinin P.I., Alekseyev A.O. Geochemical characteristics of the Holocene layer soils of the Privolzhskaya hills steppes. *VSU Bulletin, series: Geography. Geoecology*. 2008;(1):9-15. (In Russ.). EDN: JQPYBT.
13. Gar'kusha L.Ya., Bagrova L.A., Pozachenyuk E.A. Diversity of Crimean landscapes with Mediterranean elements of flora. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Geography Sciences*. 2012;25(2):36-47. (In Russ.).
14. Bagrov N.V., Bokov V.A., eds. *Ecology of Crimea*. Reference manual. Simferopol: Crimean Educational and Pedagogical State Publishing House; 2003. 360 p. (In Russ.).
15. Didukh Ya.P., Vakarenko L.P., Shelag-Sosonko Yu.R. Geobotanical map of the Karadag mts. (Crimea) as a basis for the study of anthropogenic successions in vegetation. *Geobotanical Mapping*. 1981;(1981):25-33. (In Russ.). EDN: HSNANW.
16. Ergina E.I., Gorbunov R.V., Tabunschik V.A., Petlyukova E.A. Soil diversity of the Crimean Peninsula. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(1):61-69. (In Russ.). EDN: WIRNSC. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-61-69>
17. Drygval P.V., Drygval A.V., Stanis E.V., Lebedev Ya.O., Gorbunov R.V., Stanis E.V., Pham C.N. Distribution and migration of chemical elements in soils of the Magnitnyj ridge (Karadag nature reserve). *Proceedings of the T.I. Vyazemsky Karadag scientific station - Nature Reserve of the RAS*. 2021;(4):43-53. (In Russ.). EDN: TLGJLM. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.20.06>
18. Drygval P.V., Drygval A.V., Lebedev Ya.O., Priimak A.S., Gorbunova T.Yu., Bobko N.I., Lyapunov S.M., Ergina E.I. Spatial differentiation and geochemical features of the soil cover of the karadag state nature reserve. *Soils are a strategic resource of Russia*. Abstracts of reports of the VIII Congress of the Dokuchaev Soil Scientists Society and the School of Young Scientists on Soil Morphology and Classification. Moscow, Syktyvkar, 2021:625-627. (In Russ.). EDN: RBGVMW.
19. Molina-Venegas R., Aparicio A., Lavergne S., Arroyo J. How soil and elevation shape local plant biodiversity in a Mediterranean hotspot. *Biodiversity and Conservation*. 2016;25(6):1133-1149. EDN: WSORHV. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1113-y>
20. Venevsky S., Venevskaya I. Hierarchical systematic conservation planning at the national level: identifying national biodiversity hotspots using abiotic factors in Russia. *Biological Conservation*. 2005;124(2):235-251. EDN: LJABWV. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.01.036>
21. Sarkina I.S., Mironova L.P. Role of forest culture in mycobiota forming in Karadag nature reserve (macrofungi). *100 years of the T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station*. Simferopol: Lower Oreanda; 2015:241-253. (In Russ.). EDN: XEVCZT.
22. Plyusnina I.I. *Infrared spectra of minerals*. Moscow: Moscow University Press; 1976. 175 p. (In Russ.).
23. Baes A.U., Bloom P.R. Diffuse reflectance and transmission Fourier transform infrared (DRIFT) spectroscopy of humic and fulvic acids. *Soil Sci Soc. Am. J.* 1989;53(3):695-700. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300030008x>

24. Tarasevich B.N. *IR spectra of the main classes of organic compounds*. Reference materials. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2012. 55 p. (In Russ.).
25. Vinogradov A.P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geochemistry*. 1962;(7):555-571. (In Russ.). EDN: SIZCQF.
26. Dobrovolsky V.V. *Geochemistry of soils and landscapes. Selected works*. Moscow: Scientific World; 2009. Vol. 2. 752 p. (In Russ.).
27. Gallet S., Bor-ming J., Masayuki T. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China and paleoclimatic implications. *Chem. Geol.* 1996;133(1-4):67-88. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00070-8)
28. Shishov L.A., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnostics of soils of Russia*. Smolensk: Ecumene; 2004. 342 p. (In Russ.). EDN: PTEEQE.
29. Robinson L., Robertson J. In situ FTIR analysis of soils for forensic applications. *Spectroscopy Supplements*. 2015;30(8):22-30.
30. Spaccini R., Piccolo A., Haberhauer G., Stemmer M., Gerzabek M.H. Decomposition of maize straw in different European soils as revealed by DRIFT spectra of soil particle fractions. *Geoderma*. 2001;99(3-4):245-260. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00073-2)
31. Williams D.J.-I., Fleming I. *Spectroscopic methods in organic chemistry*. London: McGraw-Hill; 1966. 222 p.
32. Chertko N.K., Chertko E.N. *Geochemistry and ecology of chemical elements*. Minsk: Publishing Center of BSU; 2008. 140 p. (In Russ.). EDN: QKHIJT.
33. Ergina E.I. *Spatio-temporal patterns of modern soil formation processes on the Crimean Peninsula*. Simferopol: Arial; 2017. 220 p. (In Russ.). EDN: YNYYNX.

Информация об авторах

Елена Ивановна Ергина – доктор географических наук, профессор, профессор кафедры физической географии и геоморфологии КФУ им. Вернадского.

Игорь Владимирович Алексашкин – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры геоэкологии Таврической академии КФУ им. В.И. Вернадского, заместитель директора по молодежной политике и воспитательной работе Института биохимических технологий, экологии и фармации КФУ им. В.И. Вернадского, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатически активных веществ КНС им. Т.И. Вяземского.

Виктория Викторовна Дубас – ведущий специалист дирекции Института биохимических технологий, экологии и фармации КФУ им. В.И. Вернадского, младший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатически активных веществ КНС им. Т.И. Вяземского, аспирант ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского.

Вячеслав Александрович Литвин – заместитель директора по ООПТ – директор КНС им. Т.И. Вяземского.

Юлия Сергеевна Хижняк – заместитель директора по общим вопросам КНС им. Т.И. Вяземского.

Information about the authors

Elena I. Ergina – Doctor of Science (Geography), Professor, Professor of the Department of Physical Geography and Geomorphology, VCFU.

Igor V. Aleksashkin – Candidate of Science (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geoecology, Taurida Academy, VCFU; Deputy Director for Youth Policy and Educational Work, Institute of Biochemical Technologies, Ecology, and Pharmacy, VCFU; Senior Researcher of the Laboratory for Monitoring Climate-Active Substances, VKSS.

Victoria V. Dubas – Leading Specialist of the Institute of Biochemical Technologies, Ecology, and Pharmacy, VCFU; Junior Researcher of the Laboratory for Monitoring Climate-Active Substances, VKSS; Postgraduate Student, KIBSS.

Vyacheslav A. Litvin – Deputy Director for Protected Areas - Director of the VKSS.

Yulia S. Khizhnyak – Deputy Director for General Affairs, VKSS.

Статья поступила в редакцию 26.02.2025; одобрена после рецензирования 04.04.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 26.02.2025; approved after reviewing 04.04.2025; accepted for publication 10.07.2025.

Научная статья
УДК 556.5;504.455
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-101-112>

СУЛЬФИДЫ И МЕТАН В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И ЗАТОПЛЕННЫХ ПОЧВАХ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Ю.А. Федоров^{1✉}, А.Е. Косолапов², Д.Н. Гарькуша³, Л.Ю. Дмитрик⁴, Е.В. Усова⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Ростов-на-Дону, Россия

^{1, 3} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ fedorov@sfedu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

² chimanalit@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0440-9036>

³ gardim@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5026-2103>

⁴ dimikarmy13@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6314-1383>

⁵ chim_analit2@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5800-3706>

Аннотация. Цимлянское водохранилище является источником поступления в атмосферу парниковых газов, например метана, который образуется в основном в анаэробных условиях донных отложений. Отложения искусственных водоемов представлены современными седиментами и погребенными под ними почвами. Цель работы – установление особенностей распределения содержаний метана и сульфидной серы в отложениях, образовавшихся после заполнения чаши водохранилища, и в подстилающих их затопленных почвах. В основу исследования положены данные, полученные в ходе экспедиционных работ (осень 2023 г.) по отбору проб донных отложений в Цимлянском водохранилище. В полученных образцах погоризонтно определялись концентрации CH_4 , сульфидной серы, значения плотности, влажности, рН и Eh. Показано, что в донных отложениях водохранилища протекают сочетанные во времени и пространстве процессы метаногенеза и сульфидообразования. Установлено заметное снижение содержаний CH_4 и $S_{сульфид}$ при переходе от современных осадков водохранилища к хорошо визуально диагностируемым по структуре затопленным почвам, что обусловливается исчерпанием лабильного органического вещества в почвах и, как следствие, затуханием процессов метаногенеза и сульфатредукции. По расположению границы между современными осадками и затопленными почвами рассчитана скорость осадконакопления на станции, расположенной в центральной части Цимлянского водохранилища, составившая 0,52 см/год.

Ключевые слова: искусственные водоемы, донные отложения, затопленные почвы, метан, сульфидная сера, сероводород, скорость осадконакопления

Для цитирования: Федоров Ю.А., Косолапов А.Е., Гарькуша Д.Н., Дмитрик Л.Ю., Усова Е.В. Сульфиды и метан в донных отложениях и затопленных почвах Цимлянского водохранилища // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 101–112. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-101-112>

Благодарности: работа выполнена в рамках проведения исследований по оценке интенсивности эмиссионных потоков климатически активных газов из Цимлянского водохранилища в рамках создания и функционирования карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» М7.7/08-18-24.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

SULFIDES AND METHANE IN BOTTOM SEDIMENTS AND FLOODED SOILS OF THE TSIMLYANSK RESERVOIR

Yu.A. Fedorov^{1✉}, A.E. Kosolapov², D.N. Gar'kusha³, L.Yu. Dmitrik⁴, E.V. Usova⁵

© Федоров Ю.А., Косолапов А.Е., Гарькуша Д.Н., Дмитрик Л.Ю., Усова Е.В., 2025

^{1, 2, 3, 4, 5} Russian Scientific Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don, Russia

^{1, 3} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ fedorov@sfedu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

² chimanalit@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0440-9036>

³ gardim@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5026-2103>

⁴ dimikarmy13@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6314-1383>

⁵ chim_analit2@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5800-3706>

Abstract. The Tsimlyansk reservoir is a source of greenhouse gases into the atmosphere, for example, methane, which is formed mainly under anaerobic conditions of bottom sediments. The deposits of artificial reservoirs are represented by modern sediments and buried soils. The aim of the work is to establish the distribution of methane and sulfide sulfur contents in sediments formed after filling the reservoir bowl and in the underlying flooded soils. The work is based on data obtained during the expeditionary work on sampling bottom sediments in the Tsimlyansk reservoir, conducted in the fall of 2023. The concentrations of CH₄, sulfide sulfur, density, humidity, pH, and Eh were determined over the horizon in the obtained samples. It is shown that the processes of methanogenesis and sulfide formation combined in time and space take place in the bottom sediments of the reservoir. A noticeable decrease in the contents of CH₄ and S_{sulfide} was found during the transition from modern reservoir sediments to well-visually diagnosed structurally flooded soils, which is caused by the depletion of labile organic matter in soils and, as a result, the attenuation of the processes of methanogenesis and sulfate reduction in them. Based on the location of the boundary between modern precipitation and flooded soils, the sedimentation rate at the station located in the central part of the Tsimlyansk reservoir was calculated at 0.52 cm/year.

Keywords: artificial reservoirs, bottom sediments, flooded soils, methane, sulfide sulfur, hydrogen sulfide, sedimentation rate

For citation: Fedorov Yu.A., Kosolapov A.E., Gar'kusha D.N., Dmitrik L.Yu., Usova E.V. Sulfides and Methane in Bottom Sediments and Flooded Soils of the Tsimlyansk Reservoir. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):101-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-101-112>

Acknowledgements: the work was carried out as part of research to assess the intensity of emission fluxes of climatically active gases from the Tsimlyansk reservoir as part of the creation and operation of the carbon landfill "Tsimlyansk reservoir" M7.7/08-18-24.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Водохранилища являются частью глобальной «сети пресной воды», в результате эксплуатации которых в атмосферу возвращается «часть земного углерода» в виде метана (CH₄) и диоксида углерода (CO₂) [1].

Цимлянское водохранилище – одно из наиболее крупных в степной зоне, «метановый след» от него рассмотрен в работах [2–5]. В настоящее время здесь проводятся исследования по оценке интенсивности эмиссионных потоков климатически активных газов в рамках функционирования карбонового полигона [6].

Водохранилище было полностью наполнено в 1953 г. в результате перекрытия реки Дон на 327-м километре от устья. Оно вытянуто в северо-восточном направлении, имеет общую длину 281 км и предназначено для внутригодового и многолетнего регулирования водного стока р. Дон, улучшения условий судоходства, выработки электроэнергии, развития орошаемого земледелия. Водохранилище расположено в регионе, подверженном влиянию сельскохозяйственных и промышленных предприятий, а также городской агломерации, состоящей из двух достаточно крупных городов – Волгодонска и Цимлянска и более мелких населенных пунктов [5, 7].

Берега Цимлянского водохранилища сложены в основном мягкими глинами с подстилающими слоями – ракушечником и мергелем. Абразия и размыв глинистых обрывов создают условия для интенсивного заиления водохранилища и его обмеления [8].

Режим биогенных веществ в водохранилище, с которыми тесно связано образование в нем цианобактерий, определяется стоком Дона, интенсивностью биологического распада органических веществ (ОВ) и процессов жизнедеятельности водных организмов. Ежегодно с водосборной площади в водохранилище поступают десятки тонн азота и фосфора, в основном с абразионным материалом. Эти два фактора обуславливают интенсивность процессов эвтрофирования водоема [9].

Район Цимлянского водохранилища располагается в целом в сухостепной зоне, где развиты каштановые почвы. Здесь выделяются темно-каштановые, каштановые и светло-каштановые солонцеватые и слабосолонцеватые почвы. Исключение составляют лишь пески Доно-Цимлянского массива, где на буграх и грядах распространены слабообразованные примитивные песчаные почвы [10].

Строительство крупных плотин и водохранилищ, особенно на равнинных реках, является одной из главных причин значительных потерь ценных продуктивных почв в результате их затопления и подтопления. Затопленными чаще оказываются наиболее плодородные почвы пойменных террас, а также освоенные зональные почвы речных долин [11]. Именно так и произошло при заполнении водой чаши Цимлянского водохранилища. Почвы поймы р. Дон, а также расположенные выше на склонах, оказавшиеся при затоплении под слоем воды, подверглись слитизации, осолонцеванию и засолению. На первом этапе их трансформации под слоем воды должно было последовать сначала разрушение остатков почвенного ОВ вследствие их окисления и механического воздействия. Затем после образования первых слоев донных отложений и проникновения иловых вод в кровлю затопленных почв они могли стать на непродолжительное время источником восстановленных газов, главным образом метана и сероводорода. После исчерпания лабильного ОВ и сульфатов процессы метаногенеза и сульфатредукции должны были существенно замедлиться или вообще прекратиться. Это согласуется с [12]: практически полная деградация ОВ затопленных почв происходит в течение первого десятилетия после образования водохранилища.

В настоящей работе проанализированы результаты определения по вертикальному профилю донных отложений Цимлянского водохранилища содержания метана и сульфидной серы с целью установления особенностей их распределения в отложениях, образовавшихся после заполнения чаши водохранилища, и в подстилающих их затопленных почвах.

Материалы и методы

Осенью 2023 г. (с 27 сентября по 2 октября), в фазу осеннего перемешивания водоема, были проведены экспедиционные работы по отбору проб донных отложений в Цимлянском водохранилище. Расположение станций отбора проб схематично представлено на рис. 1, а их и координаты – в табл. 1.

Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение метана и сульфидной серы проведены согласно аттестованным методикам [13, 14]. Донные отложения отбирали ударной трубкой конструкции ГОИН согласно ПНД Ф 12.1:2.2:2.3:3.2-03 «Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления». В каждой точке бралась одна проба донных отложений, при этом учитывалась ненарушенность стратификации и общей структуры образца. Измерение CH_4 выполнено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Измерение массовой доли сульфидной серы ($S_{\text{сульфид}}$) основано на переводе сульфидов донных отложений в сероводород действием соляной кислоты и последующей отдувке сероводорода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и его определении фотометрическим методом с N,N-диметил-p-фенилендиамином [14]. При этом в общее содержание $S_{\text{сульфид}}$ входят как растворенные в иловой воде свободный сероводород (сумма недиссоциированных молекул H_2S , ионов гидросульфида HS^- и ионов сульфида S^{2-}) и сульфиды щелочных металлов, так и сульфиды, содержащиеся в твердой фракции, которые представляют собой сульфиды железа и тяжелых металлов, не растворимые в воде, но растворимые в кислоте.

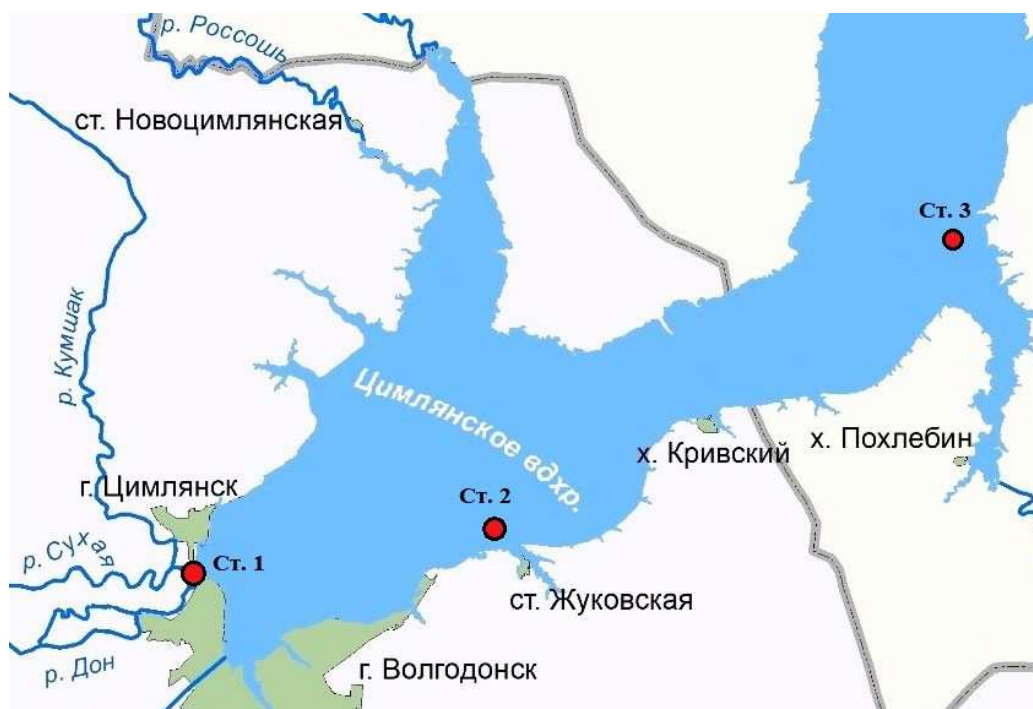


Рис. 1. Схема станций отбора проб в Цимлянском водохранилище / Fig. 1. Scheme of sampling stations in the Tsimlyansk reservoir

Таблица 1 / Table 1

Координаты станций отбора проб в Цимлянском водохранилище / Coordinates of sampling stations in the Tsimlyansk reservoir

№ станции	Местоположение	Координаты, с.ш. / в.д.	Глубина, м
1	Нижний бьеф Цимлянского гидроузла (ГУ)	47°36'16.70" / 42°06'24.30"	8,5
2	Ст. Жуковская, приплотинный участок, верт. 24	47°39'17.60" / 42°27'10.50"	14
3	Центральный участок, х. Красноярский, верт. 29	47°53'43.00" / 42°59'41.60"	10

Определение CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$ проведено при естественной влажности отложений, при этом их концентрации выражены, соответственно, в мкг/г и мг/г влажного веса (вл. в.). Одновременно с отбором проб в заранее взвешенные и пронумерованные бюксы отобрана навеска отложений для определения их влажности и плотности. Величины Eh и pH измерены с помощью портативного pH-метра-иономера «Экотест-2000» сразу после отбора проб.

Результаты и обсуждение

Погоризонтные вариации физико-химических показателей и уровней содержания CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$ в отобранных колонках донных отложений представлены в табл. 2. Показатель плотности в общем массиве отобранных проб изменялся в интервале от 0,658 до 2,969 г/мл (в среднем 1,531 г/мл). Значения pH колебались от 7,17 до 7,9 (в среднем 7,62). Минимальное значение окислительно-восстановительного потенциала составило -175,2 мВ, максимальное ... +19,4 мВ, среднее - 47,3 мВ. Влажность отобранных образцов варьировалась в пределах 32,2–68,9 % (в среднем 52,3 %). Интервал колебания уровня содержания метана во всех пробах составил 0,13–42,6 мкг/г (в среднем 13,4 мкг/г). Минимальная концентрация $\text{S}_{\text{сульфид}}$ - <0,01 мг/г, максимальная - 1,24 мг/г, среднее - 0,59 мг/г.

В ходе экспедиционных работ были получены данные о содержании в донных отложениях CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$. На их основе были построены графики распределения этих показателей по вертикали отложений (рис. 2). Так, на станции 1, расположенной в нижнем бьефе Цимлянского ГУ, содержание $\text{S}_{\text{сульфид}}$ в поверхностном 0–2-сантиметровом слое отложений было максимальным для отобранного здесь керна (длиной 40 см) и равнялось 0,83 мг/г. В горизонте 5–10 см значение данного показателя снизилось до минимума – 0,28 мг/г. Ниже по керну отложений в горизонтах 15–20 и 25–30 см концентрация сульфидов увеличилась до 0,31 и 0,63 мг/г соответственно. Концентрация метана в отобранном на станции 1 керне донных отложений возрастала от поверхностного 0–2-сантиметрового слоя (9,92 мкг/г) к нижнему (46,2 мкг/г) с промежуточными значениями в горизонтах 5–10, 15–20 и 25–30 см (9,81; 24,1 и 25,4 мкг/г соответственно).

Таблица 2 / Table 2

Результаты определения концентраций CH_4 , $\text{S}_{\text{сульфид}}$ и других физико-химических показателей в донных отложениях Цимлянского водохранилища, полученные в ходе экспедиционных исследований осенью 2023 г. / The results of determination of concentrations of CH_4 , $\text{S}_{\text{sulfide}}$ and other physical and chemical parameters in the bottom sediments of the Tsimlyansk reservoir obtained during expeditionary research in the fall of 2023

№ станции	Расположение	Горизонт, см	pH	Eh, мВ	Плотность, г/мл	Влажность, %	CH_4 , мкг/г вл. в.	$\text{S}_{\text{сульфид}}$, мг/г вл. в.
1	Нижний бьеф Цимлянского ГУ	0–2	7,71	–97,6	2,969	42,1	9,92	0,83
		5–10	7,69	–60,9	2,004	32,2	9,81	0,28
		15–20	7,75	–6,3	2,170	52,5	24,1	0,31
		25–30	7,73	–6,0	1,447	49,1	25,4	0,63
		35–40	7,79	+19,0	2,367	56,3	42,6	н/д
2	Ст. Жуковская, приплотинный участок	0–2	7,87	+19,4	0,749	46,9	0,37	0,61
		2–5	7,90	–5,7	0,658	59,0	0,13	1,24
		5–10	7,83	–19,2	0,844	56,8	0,21	0,35
		15–20	7,55	–22,1	1,158	54,3	14,7	0,74
		95–100	7,63	–10,6	1,856	41,5	1,19	1,16
3	Центральный участок, х. Красноярский	0–2	7,61	–25,4	0,956	68,9	0,59	0,42
		2–5	7,52	–31,5	1,336	68,0	0,19	0,30
		5–10	7,57	–16,4	1,535	54,1	0,22	0,35
		15–20	7,56	–48,8	1,438	55,9	16,3	1,23
		25–30	7,20	–175,1	1,419	56,7	37,0	0,73
		35–40	7,44	–175,2	1,499	55,4	36,0	0,31
		50–54	7,17	–141,3	1,620	39,3	9,38	<0,01

В описанном керне донных отложений распределение CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$ в верхнем горизонте носит обратный характер, в нижних горизонтах – синхронизируется. Такая ситуация наблюдается, если единственным процессом, контролирующим метаногенез, является редукция диоксида углерода водородом, а сульфатных ионов достаточно для генерации сероводорода сульфатредуцирующими бактериями [2]. Последние, согласно термодинамическим расчётам, выигрывают у метанобразующих архей конкуренцию за молекулярный водород, что может вызывать существенное подавление процесса метаногенеза [15]. В случае, если вода содержит низкое количество сульфат-иона (SO_4^{2-}), подавления метаногенеза не происходит, а процесс сульфатредукции ограничивается небольшим по мощности слоем отложений. Этот вывод коррелирует с мнением, что содержание сульфатов определяет, какой процесс – сульфатредукция или метаногенез – является доминирующим в анаэробном разрушении органического вещества [16].

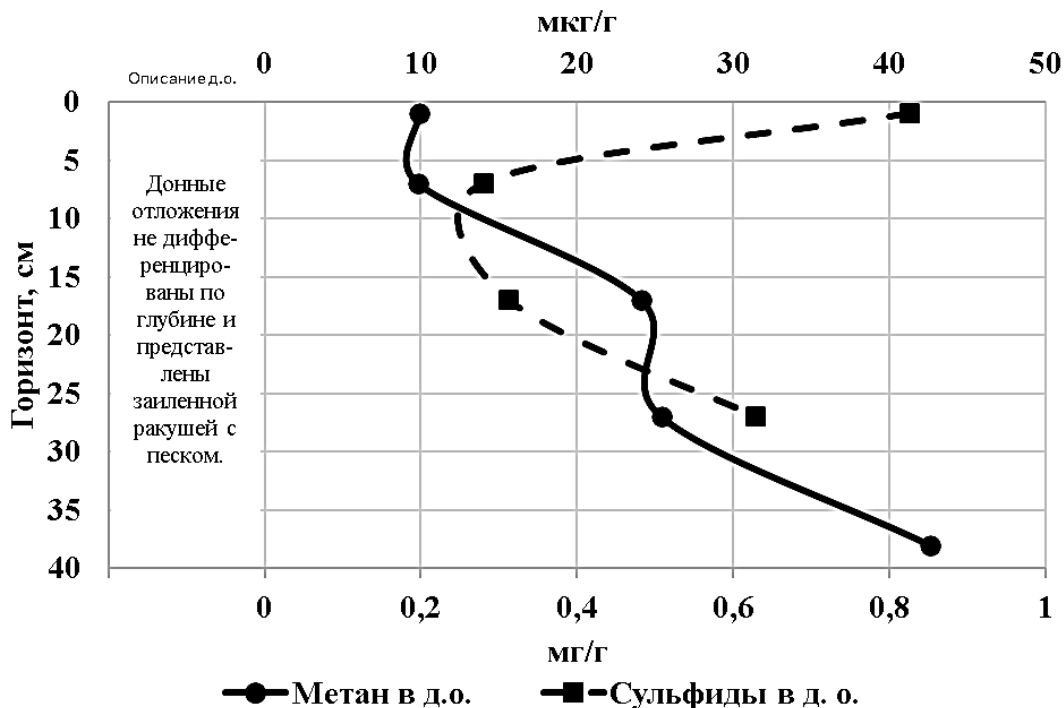


Рис. 2. Распределение содержания CH_4 , мкг/г, и $S_{\text{сульфид}}$, мг/г, по вертикальному профилю донных отложений на станции 1 / Fig. 2. Distribution of the content of CH_4 , mcg/g, and S_{sulfide} , mg/g, along the vertical profile of bottom sediments at Station 1

Отметим, что станция 1 находится в непосредственной близости от места разгрузки плотины Цимлянской ГЭС. Донные отложения здесь не однородны и не дифференцированы по глубине, представлены заиленной ракушей с песком, при этом горизонт погребенных почв не выявлен. То есть вся отобранная колонка донных отложений представлена современными осадками, в которых, судя по относительно высоким концентрациям метана [2], увеличивающимся с глубиной, протекают достаточно интенсивные процессы метаногенеза, несколько подавляемые в верхней части процессом сульфатредукции.

На станции 2, расположенной у ст. Жуковской, содержание $S_{\text{сульфид}}$ в поверхностном слое 0–2 см донных отложений составило 0,61 мг/г; в слое 2–5 см ее содержание было максимальным – 1,24 мг/г; в слое 5–10 см – минимальным – 0,35 мг/г, после чего концентрация $S_{\text{сульфид}}$ возросла до 0,74 мг/г – в слое 15–20 см и до 1,16 мг/г – в слое 95–100 см (рис. 3). Содержание CH_4 в поверхностном 0–2 см слое донных отложений составляло 0,37 мкг/г; на глубине 2–5 см оно было минимальным – 0,13 мкг/г; в слое 5–10 см наблюдалось незначительное увеличение содержания этого показателя до 0,21 мкг/г, после чего в слое 15–20 см его содержание резко увеличилось до 14,7 мкг/г, а в слое 95–100 см опустилось до 1,19 мкг/г.

Анализ показывает, что распределение CH_4 и $S_{\text{сульфид}}$ в отобранном керне отложений станции 2 отличается. Так, в верхнем 0–10-сантиметровом горизонте содержание CH_4 было низким и слабо изменялось, в то время как содержание $S_{\text{сульфид}}$ достигало максимума в слое 3–5 см, а в слое 5–10 см падало до минимума. На глубине 15–20 см количество $S_{\text{сульфид}}$ возросло в 2 раза, а содержание CH_4 в этом слое увеличилось в 2 раза. В 95–100-сантиметровом слое содержание метана резко снизилось, а $S_{\text{сульфид}}$, напротив, – увеличилось.

Таким образом, распределение CH_4 и $S_{\text{сульфид}}$ по вертикальному профилю донных отложений на станции 2 антагонировало друг другу. И если в верхних горизонтах (до 20 см) это вызвано теми же причинами, что и на станции 1, – термодинамическим преимуществом сульфатредукции над метаногенезом, то высокое содержание $S_{\text{сульфид}}$ в нижнем горизонте, наряду с резким запахом H_2S , может свидетельствовать о превышении продуктивности сульфатредукции над ресурсом имеющегося в этом слое отложений реакционноспособного железа [17]. Последнее в процессе диагенеза связывается с H_2S и выводится в виде сульфидов железа из круговорота

соединений серы. В результате образуется гидротроилит ($\text{FeS} \times n\text{H}_2\text{O}$), который при дальнейшем «старении» осадка может преобразовываться в дисульфид железа FeS_2 (пирит, марказит). Возможно также образование дисульфидов железа в осадке напрямую, минуя промежуточную стадию образования гидросульфида железа [18]. В целом образование сульфидов и дисульфидов железа способствует снижению негативного воздействия H_2S на донные отложения и препятствует проникновению его в придонный слой воды.

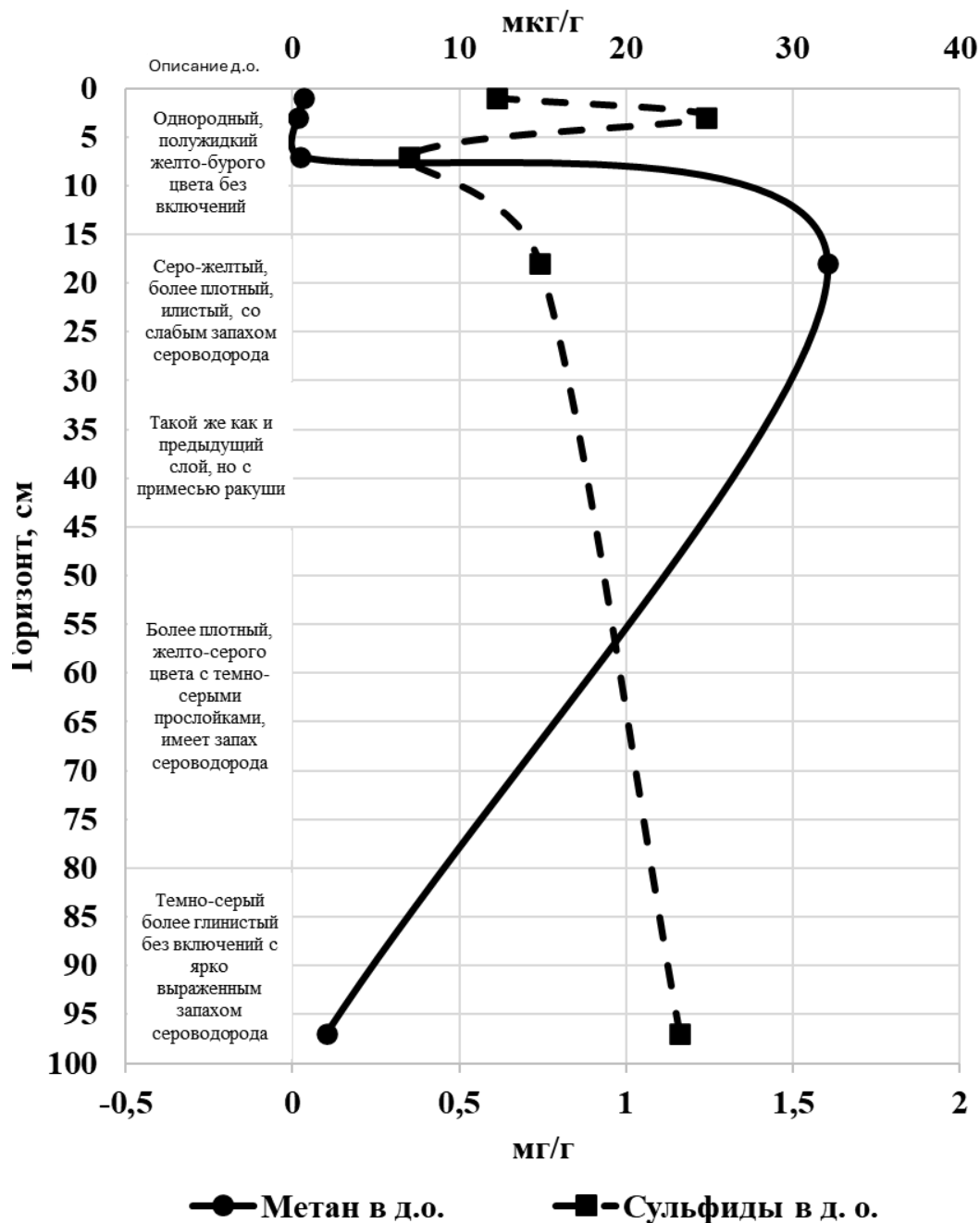


Рис. 3. Распределение содержания CH_4 , мг/г, и $S_{\text{сульфид}}$, мг/г, по вертикальному профилю донных отложений на станции 2 / Fig. 3. Distribution of CH_4 , mcg/g, and S_{sulfide} , mg/g, contents along the vertical profile of bottom sediments at Station 2

На станции 3 (рис. 4), расположенной в центральной части водохранилища на выходе из крупного речного плеса р. Аксай Курмоярский, содержание CH_4 и $S_{\text{сульфид}}$ в керне донных от-

ложений распределялось следующим образом. В поверхностном слое 0–2 см содержание сульфидной серы составляет 0,42 мг/г, в слое 2–5 см снижается до 0,3 мг/г, в слоях 5–10 и 15–20 см увеличивается до 0,35 и 1,23 мг/г соответственно (максимум для отобранного керна), после чего происходит постепенное снижение содержания $S_{\text{сульфид}}$ к нижнему слою 50–55 см до минимального значения – менее 0,01 мг/г. Содержание CH_4 в слое 0–2 см составляет 0,59 мкг/г, в горизонтах 2–5 и 5–10 см наблюдается его снижение до 0,19 (минимум) и 0,22 мкг/г. В слое 15–20 см происходит увеличение содержания CH_4 до 16,3 мкг/г, а в слоях 25–30 и 35–40 см оно достигает максимума – 37 и 36 мкг/г, после чего в самом нижнем слое 50–54 см отложений снижается до 9,38 мкг/г.

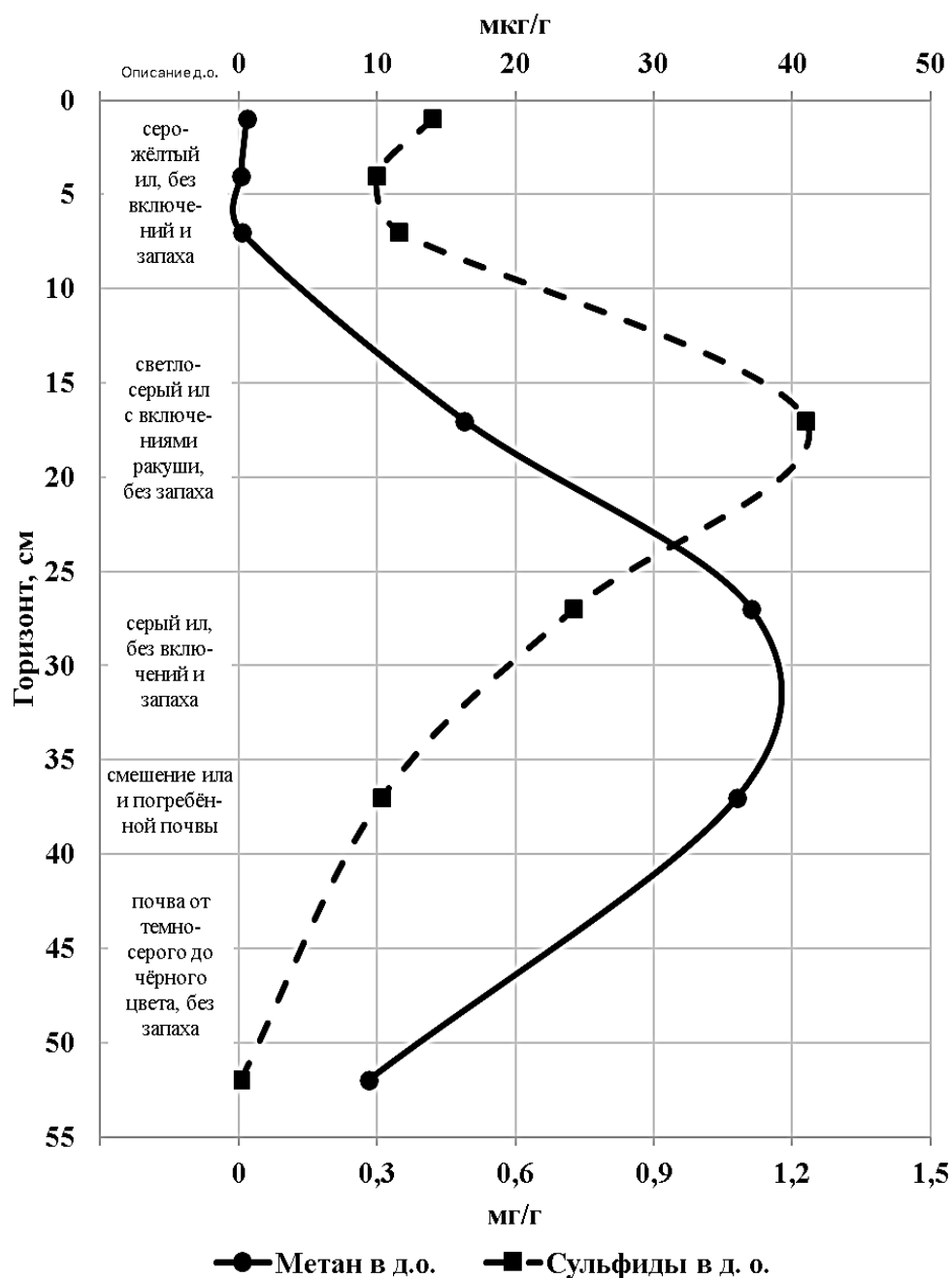


Рис. 4. Распределение содержания CH_4 , мкг/г, и $S_{\text{сульфид}}$, мг/г, по вертикальному профилю донных отложений на станции 3 / Fig. 4. Distribution of the content of CH_4 , mcg/g, and S_{sulfide} , mg/g, along the vertical profile of bottom sediments at Station 3

Распределение CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$ в отобранном керне отложений станции 3 в целом имеет сходный характер, однако расположение пиков максимумов их содержания несколько различается. Так, максимальное количество $\text{S}_{\text{сульфид}}$ фиксируется в слое 15–20 см илистых отложений с включениями раковин моллюсков. В то время как для CH_4 пик максимума выявлен ниже, в 25–30- и 35–40-сантиметровом слоях, в последнем из которых наблюдается размытая граница илистых отложений и затопленных почв. В более глубоких горизонтах (от 40 см и ниже), представленных хорошо визуальными диагностируемыми по структуре затопленными почвами, содержание обоих исследуемых компонентов значительно снижается. Это подтверждает высказанный выше тезис об исчерпании лабильного органического вещества в почвах в течение первого десятилетия после их затопления и, как следствие, затухания процессов метаногенеза и сульфатредукции в них.

Анализ данных показывает, что распределение метана и сульфидной серы по вертикали донных осадков в целом коррелирует с изменением их литологического состава. Так, на станции 2 (рис. 3) в самом нижнем горизонте (95–100 см), представленном плотными слитизированными суглинисто-глинистыми отложениями коренного ложа водохранилища, содержание CH_4 значительно снижается по сравнению с вышерасположенным слоем донных отложений. На станции 3 (рис. 4) при переходе по вертикальному профилю от современных илистых отложений с примесью ракушки, образованных после заполнения водохранилища, к затопленным почвам (горизонты ниже 37–40 см) существенно снижается содержание как CH_4 , так и $\text{S}_{\text{сульфид}}$. Таким образом, время образования в середине прошлого столетия Цимлянского водохранилища фиксируется в вертикальном разрезе донных отложений по смене их литологического типа и уровню содержания в них CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$.

В случае, если граница между современными осадками и затопленными почвами проявляется хорошо и не вызывает сомнений, можно рассчитать скорость осадконакопления на таком участке. Так, исходя из расположения установленной границы с затопленными почвами, слой современных донных осадков, накопленных на станции 3 после образования водохранилища в 1953 г., составляет около 37 см. С учетом продолжительности их накопления (71 год) скорость осадконакопления на этой станции, расположенной в центральной части Цимлянского водохранилища на выходе из крупного речного плеса р. Аксай Курмоярский, достигает 0,52 см/год. Данное значение входит в диапазон скоростей осадконакопления (0,1–2,7 см/год), рассчитанных для различных районов Цимлянского водохранилища по расположению в отложениях двух пиков максимума искусственного радионуклида ^{137}Cs , связанных с выпадениями после аварии на Чернобыльской АЭС (обычно на глубине 10–15 см) и с испытанием ядерного оружия (на глубине 30–40 см) [19].

Заключение

В настоящей работе проанализированы результаты определения по вертикали донных отложений Цимлянского водохранилища содержания метана и сульфидной серы с целью установления особенностей их распределения в отложениях, образовавшихся после заполнения чаши водохранилища, и в подстилающих их затопленных почвах. Установлено заметное снижение содержания CH_4 и $\text{S}_{\text{сульфид}}$ при переходе от современных осадков водохранилища к хорошо визуальными диагностируемым по структуре затопленным почвам, что обусловливается исчерпанием лабильного органического вещества в почвах и, как следствие, затуханием процессов метаногенеза и сульфатредукции.

По расположению границы между современными осадками и затопленными почвами рассчитана скорость осадконакопления на станции, расположенной в центральной части Цимлянского водохранилища на выходе из крупного речного плеса р. Аксай Курмоярский, которая составила 0,52 см/год.

В свете наблюдающегося изменения климата повышение минерализации притоков, расположенных в степной зоне юга европейской части России и, как следствие, увеличение концентрации сульфатов в водной толще Цимлянского водохранилища, вероятно, активизируют в его донных отложениях процесс сульфатредукции. Исходя из теоретико-экспериментальных предпосы-

лок, рассмотренных в настоящей статье, периодическое исчерпание в донных отложениях водохранилища реакционноспособного железа на процессы связывания образуемого сероводорода будет приводить к сероводородному заражению придонных вод, главным образом в периоды зимней и летней стратификации. В то же время усиление процесса сульфатредукции будет способствовать снижению интенсивности образования CH_4 в донных отложениях и препятствовать его эмиссии в водную толщу и далее в атмосферу.

Список источников

1. Rocher-Ros G., Stanley E.H., Loken L.C., Casson N.J., Raymond P.A., Liu S., Amatulli G., Sponseller R.A. Global methane emissions from rivers and streams // *Nature*. 2023. Vol. 621. P. 530–535. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06344-6>
2. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов н/Д.; М.: Ростиздат, 2007. 330 с.
3. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Крукиер М.Л., Калманович И.В. Оценка эмиссии метана водными объектами Ростовской области // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2015. № 3. С. 83–89. EDN: UMDOZZ.
4. Гречушникова М.Г., Ретина И.А., Казанцев В.С., Усова Е.В., Верещагин М.А., Анпилова Е.Л. Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2024. № 2. С. 80–100. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100>
5. Федоров Ю.А., Косолапов А.Е., Беляев А.И., Гарькуша Д.Н., Усова Е.В., Крукиер М.Л., Тамбиева Н.С., Дмитрик Л.Ю., Ковалев Е.А. Экспериментальные исследования концентраций и потоков метана в аквальных экосистемах (с элементами моделирования) как теоретико-методологическая основа для создания карбонового полигона // *Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг* : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Новочеркасск: Лик, 2023. Т. 1. С. 29–39. EDN: ODTDL.
6. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.Л., Верещагин М.А., Беляев А.И. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2024. № 3. С. 68–82. EDN: CXWKWU. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72>
7. Трофимчук О.А. Современное состояние альгофлоры Цимлянского водохранилища в условиях антропогенного воздействия // *Гидрохим. материалы*. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. Т. СХІІІ. С. 50–59.
8. Матишов Г.Г., Савельева О.С. Переселение жителей казачьих станиц из зоны затопления Цимлянского водохранилища: культурологический и социально-экономический аспекты // *Наука Юга России*. 2019. Т. 15, № 2. С. 97–107. <https://doi.org/10.7868/S25000640190210>
9. Лобченко Е.Е., Минина Л.И., Ничипорова И.П., Первышева О.А. Динамика качества воды Цимлянского водохранилища (за период с 1979 по 2014 год) // *Водное хозяйство России*. 2016. № 6. С. 74–92.
10. Рьльщикова А.Ю. Оценка степени трансформации природных ландшафтов прибрежной зоны водохранилищ юга России: дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д., 2009. 24 с.
11. Белицина Г.Д., Васильевская В.Д., Гришина Л.А. и др. Почвоведение: учебник для ун-тов: в 2 ч. Ч. 1: Почва и почвообразование / под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. М.: Высш. школа, 1988. 400 с.
12. Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J., Prairie Y.T., Bastviken D., Huszar V.L.M., del Giorgio P., Roland F. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude // *Nat. Geosci.* 2011. № 4. P. 593–596.
13. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Росгидромет, Гидрохим. ин-т, 2013. 19 с.
14. РД 52.24.525-2011. Массовая доля сульфидной серы в донных отложениях. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N, N-диметил-n-фенилендиамином. Ростов н/Д.: Росгидромет, Гидрохим. ин-т, 2011. 32 с.
15. Winfrey M.R., Zeikus J.G. Anaerobic metabolism of immediate methane precursors in Lake Mendota // *Appl. Environ. Microbiol.* 1979. Vol. 37, № 2. P. 244–253.
16. Кузнецов С.И., Саралов А.Е., Назина Т.Н. Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. М.: Наука, 1985. 213 с.
17. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
18. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Метан и сульфидная сера в воде и донных отложениях водотоков степной зоны европейской части России // *Геохимия*. 2024. Т. 69, № 8. С. 735–750. EDN: IYTFCA. <https://doi.org/10.31857/S0016752524080064>

19. Кузьмичев И.С., Дергачева Е.В., Нефедов В.С., Давыденко А.М., Аветисян С.Р., Стасов В.В., Бураева Е.А. Оценка скорости осадконакопления в слабопроточных водоемах на примере Цимлянского водохранилища // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 194–197. EDN: YJGYPL.

References

1. Rocher-Ros G., Stanley E.H., Loken L.C., Casson N.J., Raymond P.A., Liu S., Amatulli G., Sponseller R.A. Global methane emissions from rivers and streams. *Nature*. 2023;621:530-535. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06344-6>
2. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Methane in aquatic ecosystems*. 2nd ed., revised. and add. Rostov-on-Don, Moscow: Rostov Publishing House; 2007. 330 p. (In Russ.).
3. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Krukier M.L., Kalmanovich I.V. Assessment of methane emissions by water bodies of the Rostov region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2015;(3):83-89. (In Russ.). EDN: UMDOZZ.
4. Grechushnikova M.G., Repina I.A., Kazantsev V.S., Usova E.V., Vereshchagin M.A., Anpilova E.L. The first results of studying the spatial and temporal variability of methane content and emissions in the Tsimlyansk reservoir. *Russian Water Management: Problems, Technologies, Management*. 2024;(2):80-100. (In Russ.). <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100>
5. Fedorov Yu.A., Kosolapov A.E., Belyaev A.I., Gar'kusha D.N., Usova E.V., Krukier M.L., Tambieva N.S., Dmitrik L.Yu., Kovalev E.A. Experimental studies of methane concentrations and fluxes in aquatic ecosystems (with modeling elements) as a theoretical and methodological basis for the creation of a carbon landfill. *Water resources in the context of global challenges: environmental problems, management, monitoring*. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation. Novocherkassk: Face; 2023;1:29-39. (In Russ.). EDN: ODTDL.
6. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Kosolapov A.E., Usova E.V., Anpilova E.L., Vereshchagin M.A., Belyaev A.I. Artificial reservoirs as centers of methanogenesis (on the example of the Tsimlyansk reservoir). *Russian Water Industry: Problems, Technologies, Management*. 2024;(3):68-82. (In Russ.). EDN: CXWKWU. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72>
7. Trofimchuk O.A. The current state of the algoflora of the Tsimlyansk reservoir under anthropogenic influence. *Hydrochemical materials*. St. Petersburg: Hydrometeorological Publishing House; 1994;113:50-59. (In Russ.).
8. Matishov G.G., Savelyeva O.S. Resettlement of residents of Cossack villages from the flood zone of the Tsimlyansk reservoir: cultural and socio-economic aspects. *Science of the South of Russia*. 2019;15(2):97-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S25000640190210>
9. Lobchenko E.E., Minina L.I., Nichiporova I.P., Pervysheva O.A. Dynamics of water quality of the Tsimlyansk reservoir (for the period from 1979 to 2014). *Water Management of Russia*. 2016;(6):74-92. (In Russ.).
10. Rylshchikov A.Yu. *Assessment of the degree of transformation of natural landscapes of the coastal zone of reservoirs in the south of Russia*. PhD Thesis. Rostov-on-Don, 2009. 24 p. (In Russ.).
11. Belitsina G.D., Vasilevskaya V.D., Grishina L.A. et al. *Soil science*. Studies for universities : in 2 parts. Part 1. *Soil and soil formation*. V.A. Kovda, B.G. Rozanov (eds.). Moscow: Higher School; 1988. 400 p. (In Russ.).
12. Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J., Prairie Y.T., Bastviken D., Huszar V.L.M., del Giorgio P., Roland F. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nat. Geosci*. 2011;(4):593-596.
13. RD 52.24.511-2013. *The mass fraction of methane in bottom sediments. The method of measurement by the gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Roshydromet, Hydrochemical Institute; 2013. 19 p. (In Russ.).
14. RD 52.24.525-2011. *The mass fraction of sulfide sulfur in bottom sediments. The method of performing measurements using the photometric method with N, N-dimethyl-n-phenylenediamine*. Rostov-on-Don: Roshydromet, Hydrochemical Institute; 2011. 32 p. (In Russ.).
15. Winfrey M.R., Zeikus J.G. Anaerobic metabolism of immediate methane precursors in Lake Mendota. *Appl. Environ. Microbiol*. 1979;37(2):244-253.
16. Kuznetsov S.I., Saralov A.E., Nazina T.N. *Microbiological processes of carbon and nitrogen cycling in lakes*. Moscow: Science; 1985. 213 p. (In Russ.).
17. Volkov I.I. *Geochemistry of sulfur in ocean sediments*. Moscow: Science; 1984. 272 p. (In Russ.).
18. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Methane and sulfide sulfur in water and bottom sediments of streams of the steppe zone of the European part of Russia. *Geochemistry*. 2024;69(8):735-750. (In Russ.). EDN: IYTFCA. <https://doi.org/10.31857/S0016752524080064>

19. Kuzmichev I.S., Dergacheva E.V., Nefedov V.S., Davydenko A.M., Avetisyan S.R., Stasov V.V., Buraeva E.A. Assessment of sedimentation rate in low-flow reservoirs on the example of the Tsimlyansk reservoir. *Ecological problems. A look into the future*. Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don: SFU Publishing House; 2015:194-197. (In Russ.). EDN: YJGYPL.

Информация об авторах

Юрий Александрович Федоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ; главный научный сотрудник РосНИИВХ.

Алексей Евгеньевич Косолапов – доктор технических наук, профессор, директор РосНИИВХ.

Дмитрий Николаевич Гарькуша – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ; ведущий специалист РосНИИВХ.

Леонид Юрьевич Дмитрик – ведущий специалист отдела исследования качества вод и аналитической деятельности РосНИИВХ.

Елена Валентиновна Усова – заведующий отделом исследования качества вод и аналитической деятельности РосНИИВХ.

Information about the authors

Yuri A. Fedorov – Doctor of Science (Geography), Professor, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, SFedU; Chief Researcher, RSRIIUPWR.

Alexey E. Kosolapov – Doctor of Science (Technical), Professor, Director of the RSRIIUPWR.

Dmitry N. Garkusha – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, SFedU; Leading Specialist, RSRIIUPWR.

Leonid Yu. Dmitrik – Leading Specialist of the Department of Water Quality Research and Analytical Activities, RSRIIUPWR.

Elena V. Usova – Head of the Department of Water Quality Research and Analytical Activities, RSRIIUPWR.

Статья поступила в редакцию 10.03.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 10.03.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 10.07.2025.

Научная статья

УДК 911.52

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-113-121>

КОНСТРУКТИВНАЯ ГЕОГРАФИЯ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНА

Александр Дмитриевич Хаванский^{1✉}, Анна Борисовна Эртель², Иван Викторович Богачев³, Юлия Юрьевна Меринова⁴

^{1, 2, 3, 4} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ khovansk@yandex.ru

² ertel@sfedu.ru

³ ivanbogachev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7451-7942>

⁴ yuliyamerinova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0658-4452>

Аннотация. В настоящее время в основу социально-экономического развития региона положена концепция устойчивого развития (УР). Значительная часть аспектов УР рассматривается в различных направлениях географии: экологический аспект – экологическая география (геоэкология) и природопользование, экономический и социальный аспекты – социально-экономическая география, управленческий аспект – экологический менеджмент и управление природопользованием, образовательный и пространственный аспекты – практически во всех направлениях географии. Конструктивная география объединяет основные направления географии и изучает регион как интегральную географическую систему. Главной её целью является информационно-аналитическое и практическое обеспечение эколого-географической составляющей УР региона. К основным задачам относятся интеграция результатов исследований всех направлений географии, комплексная социально-экономическая и экологическая оценка природно-антропогенных систем, определение закономерностей их формирования, планирование и разработка практических методов достижения эколого-хозяйственного баланса, рационального природопользования, экологической безопасности и устойчивого развития региона. В процессе эколого-географического анализа региона определяются основные факторы развития территориальных систем: природно-ресурсный, демографический и экономический потенциал, уровень и качество жизни населения, состояние окружающей среды. Особое значение конструктивной географии отводится при разработке научно-методических основ экологического и географического образования для УР региона.

Ключевые слова: конструктивная география, устойчивое развитие региона, комплексная социально-экономическая и экологическая оценка

Для цитирования: Хаванский А.Д., Эртель А.Б., Богачев И.В., Меринова Ю.Ю. Конструктивная география и устойчивое развитие региона // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 113–121. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-113-121>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

CONSTRUCTIVE GEOGRAPHY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE REGION

Alexandr D. Khavanskii^{1✉}, Anna B. Ertel², Ivan V. Bogachev³, Yuliya Yu. Merinova⁴

^{1, 2, 3, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ khovansk@yandex.ru

² ertel@sfedu.ru

³ ivanbogachev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7451-7942>

⁴ yuliyamerinova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0658-4452>

© Хаванский А.Д., Эртель А.Б., Богачев И.В., Меринова Ю.Ю., 2025

Abstract. Currently, the concept of sustainable development is the basis for the socio-economic development of the region. A significant part of the aspects of sustainable development is considered in various areas of geography: the environmental aspect - environmental geography (geoecology) and nature management, the economic and social aspects - socio-economic geography, the management aspect - environmental management and nature management, educational and spatial aspects are considered in almost all areas of geography. Constructive geography combines the main areas of geography and studies the region as an integral geographical system. The main goal of constructive geography is informational, analytical and practical support for the ecological and geographical component of sustainable development of the region. The main tasks of constructive geography include the integration of research results from all areas of geography, comprehensive socio-economic and ecological assessment of natural and anthropogenic systems, determination of patterns of their formation, planning and development of practical methods for achieving ecological and economic balance, rational use of natural resources, environmental safety and sustainable development of the region. In the process of ecological and geographical analysis of the region, the main factors of development of territorial systems are determined: natural resource, demographic and economic potential, standard and quality of life of the population, state of the environment. Particular importance is given to constructive geography in the development of scientific and methodological foundations of environmental and geographical education for the sustainable development of the region.

Keywords: constructive geography, sustainable development of the region, comprehensive socio-economic and environmental assessment

For citation: Khavanskii A.D., Ertel A.B., Bogachev I.V., Merinova Yu.Yu. Constructive Geography and Sustainable Development of the Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):113-121. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-113-121>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

В настоящее время при определении основных направлений социально-экономического развития региона актуальным является формирование экономически развивающегося, социально направленного и экологически безопасного общества.

Такой подход позволяет реализовать концепция устойчивого развития (УР), предполагающая экономический рост, повышение уровня и качества жизни человека, нормализацию экологической ситуации, поддержание необходимой пропорциональности между экономикой, социальной сферой и состоянием окружающей среды как в отдельных территориальных образованиях, так и в регионе в целом.

Для определения целей и разработки стратегии УР региона важна оценка основных факторов развития. Значительная роль при этом отводится географии, которая для решения поставленных задач должна изменить методы исследований от описательных к аналитическим и изучать регион как интегральную географическую систему. В осуществлении такого подхода должны быть задействованы все направления географии: физико-географическое, экономико-географическое, эколого-географическое и разработаны методы интеграции результатов исследований по отдельным направлениям в виде комплексных оценок состояния и развития территориальных образований и региона в целом.

Такое объединяющее направление И.П. Герасимов назвал конструктивной географией, под которой он понимал комплексные географические исследования, направленные на решение разнообразных и наиболее актуальных задач науки и практики [1].

Целью данной работы является определение значения и возможностей конструктивной географии для УР региона.

Материал и методы исследования

В основу работы положены результаты анализа большого объема географической, социально-экономической и экологической информации по Ростовской области, в итоге выделены основ-

ные факторы развития, выполнена физико-географическая, экономико-географическая и геоэкологическая оценка региона, подготовлен «Эколого-географический атлас Ростовской области», включающий 55 карт, отражающих результаты исследований [2].

Результаты и обсуждение

Концепция УР затрагивает многие аспекты взаимодействия человека и окружающей среды. К основным относятся экологический, экономический, социальный, управленческий и образовательный [3, 4]. Кроме этого, важным является пространственный аспект, отражающий УР территориальных систем.

Из перечисленных выше факторов УР значительная их часть рассматривается в различных направлениях географии: экологический аспект – экологическая география (геоэкология) и природопользование, экономический и социальный аспекты – социально-экономическая география, управленческий аспект – экологический менеджмент и управление природопользованием, образовательный и пространственный аспекты – практически во всех направлениях географии.

Конечно, конструктивная география не может решить все проблемы УР, ее задача – интеграция различных направлений географии, анализ и синтез информации, определение закономерностей формирования и развития территориальных образований, разработка практических методов достижения эколого-хозяйственного баланса, рационального природопользования и устойчивого пространственного развития региона.

Исходя из этого, на современном этапе можно сформулировать цель и основные задачи конструктивной географии для достижения УР региона.

Цель конструктивной географии – информационно-аналитическое и практическое обеспечение эколого-географической составляющей УР региона.

Для УР региона конструктивная география может решать следующие основные задачи:

1. Определение экологических и географических условий, критериев и показателей УР региона.
2. Выполнение комплексной социально-экономической и экологической оценки.
3. Информационно-аналитическое и картографическое обеспечение УР региона.
4. Установление закономерностей формирования, пространственно-временной динамики, направлений и механизмов эволюции территориальных образований под влиянием природных и антропогенных факторов.
5. Выявление пространственной организации региона, оценка сбалансированности развития, определение эколого-географических проблем и перспектив его УР.
6. Стратегическое и оперативное планирование УР региона.
7. Разработка системы мер по охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов.
8. Применение современных систем управления в экологии и природопользовании на основе международных стандартов.
9. Оценка источников экологической опасности и обеспечение экологической безопасности региона.
10. Разработка научно-методических основ и реализация экологического и географического образования для УР.

Представленные выше задачи конструктивной географии в значительной степени совпадают с современными векторами развития академической географии [5].

Условия УР динамических эколого-экономических систем сформулированы и теоретически обоснованы Г.А. Угольницким [4, 6]. К ним относятся гомеостаз, компромисс и динамическая согласованность, которые являются необходимыми, а в совокупности и достаточными условиями их УР.

Для УР эколого-географических систем требования гомеостаза заключается в том, чтобы все показатели функционирования территориальных природно-антропогенных систем в течение длительного времени не выходили за пределы заданного интервала, который определяется нормативами воздействия на окружающую среду.

Экологический компромисс предполагает учет и согласование интересов в области охраны окружающей среды и использования природных ресурсов всеми заинтересованными сторонами: природопользователями, акционерами, природоохранными органами, общественными организациями, населением. При этом компромисс должен учитывать условие гомеостаза.

Для реализации динамической согласованности нужно, чтобы краткосрочные экологические цели различных организаций в составе региона были направлены на достижение долгосрочных региональных показателей. Это условие можно выполнить за счет разработки экологической стратегии региона.

В процессе разработки и реализации программ и планов УР необходима обширная информация об основных факторах развития территориальных образований и региона в целом. Для этого проводится комплексная социально-экономическая и экологическая оценка региона, включающая физико-географический, экономико-географический и геоэкологический анализ состояния территориальных природно-антропогенных систем.

Физико-географический анализ предназначен для изучения и выявления пространственно-временных особенностей формирования природных условий и ресурсов, природных и природно-антропогенных ландшафтов, типов природопользования, проведения природно-антропогенной дифференциации региона, оценки его территориальной структуры и природно-ресурсного потенциала.

При экономико-географическом анализе выделяются основные факторы развития: демографический и экономический потенциал, уровень и качество жизни населения, производится оценка социально-экономического состояния территориальных образований, устанавливаются диспропорции и проблемы развития региона.

Геоэкологический (эколого-географический) анализ включает установление основных факторов воздействия на окружающую среду, антропогенной нагрузки, оценку загрязнения и деградации отдельных компонентов окружающей среды, комплексную геоэкологическую оценку региона. Вследствие такого анализа определяется степень напряженности экологической ситуации в территориальных образованиях, пространственно-временные особенности ее формирования и выявляются экологические проблемы.

Комплексная социально-экономическая и экологическая оценка региона включает интегрирование результатов физико-географического, экономико-географического и геоэкологического анализа территориальных образований, оценку сбалансированности их развития, установление пространственной организации региона, выявление эколого-географических проблем и перспектив УР региона.

На основании этого устанавливаются закономерности формирования, пространственно-временная динамика, направления и механизмы эволюции территориальных систем региона под влиянием природных и антропогенных факторов. Для этого строятся графики изменения основных показателей социально-экономического и экологического состояния территориальных образований за 20-, 30-летние промежутки, карты пространственного распределения этих показателей через 5–10 лет, выявляются происходящие изменения в территориальных образованиях, особенности их формирования и развития.

Оценка сбалансированности развития территориальных образований производится с помощью пятилучевых диаграмм, на которых отражается относительный уровень основных факторов развития и характера эколого-хозяйственного баланса.

Для оценки степени и направлений развития принимаются критерии и показатели УР региона. Критерии определяют значения диапазонов природно-антропогенных систем, в которых возможно их нормальное существование и развитие. В качестве критериев выступают необходимые для данного периода времени значения численности населения, роста экономики, уровня и качества жизни населения, состояния окружающей среды. Показателями являются численные значения основных параметров экономики, социальной сферы и окружающей среды, которые использовались в процессе анализа и оценки региона [7].

Для решения выявленных проблем и достижения целевых показателей развития региона и его территориальных образований производится планирование, разработка и реализация проектов УР (рис. 1).

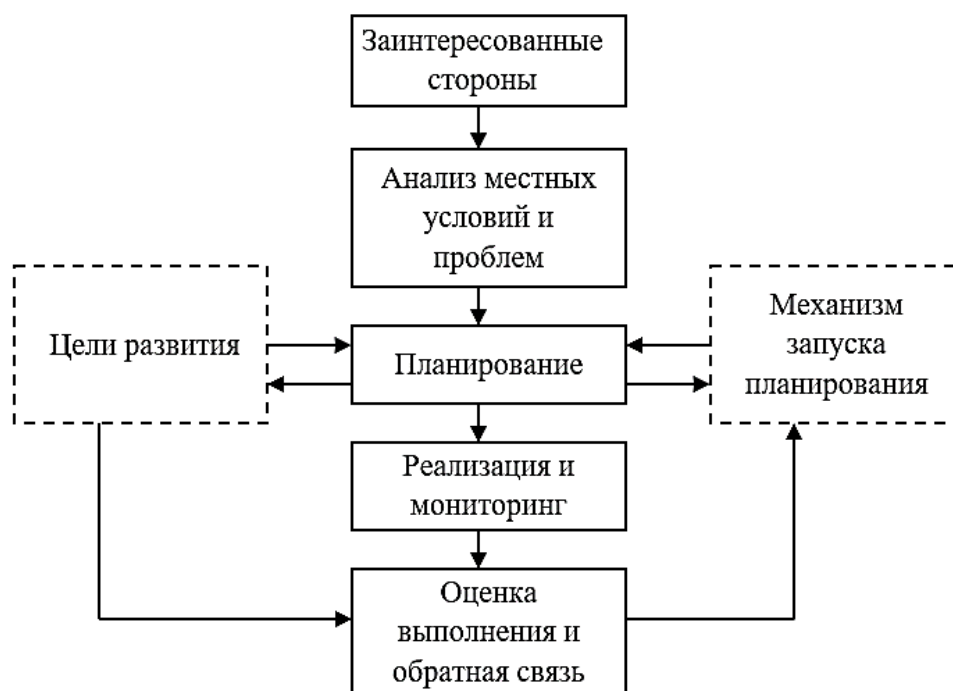


Рис. 1. Схема планирования и реализации проектов УР
 / Fig. 1. Scheme of planning and implementation of sustainable development projects

Однако для достижения УР и соблюдения условия динамической согласованности необходимо осуществлять стратегическое и оперативное планирование. В процессе стратегического планирования определяются долгосрочные цели и разрабатывается стратегия УР региона. Оперативное планирование включает установление среднесрочных целей, выбор и обоснование мероприятий, формирование программ и планов УР (рис. 2, 3).

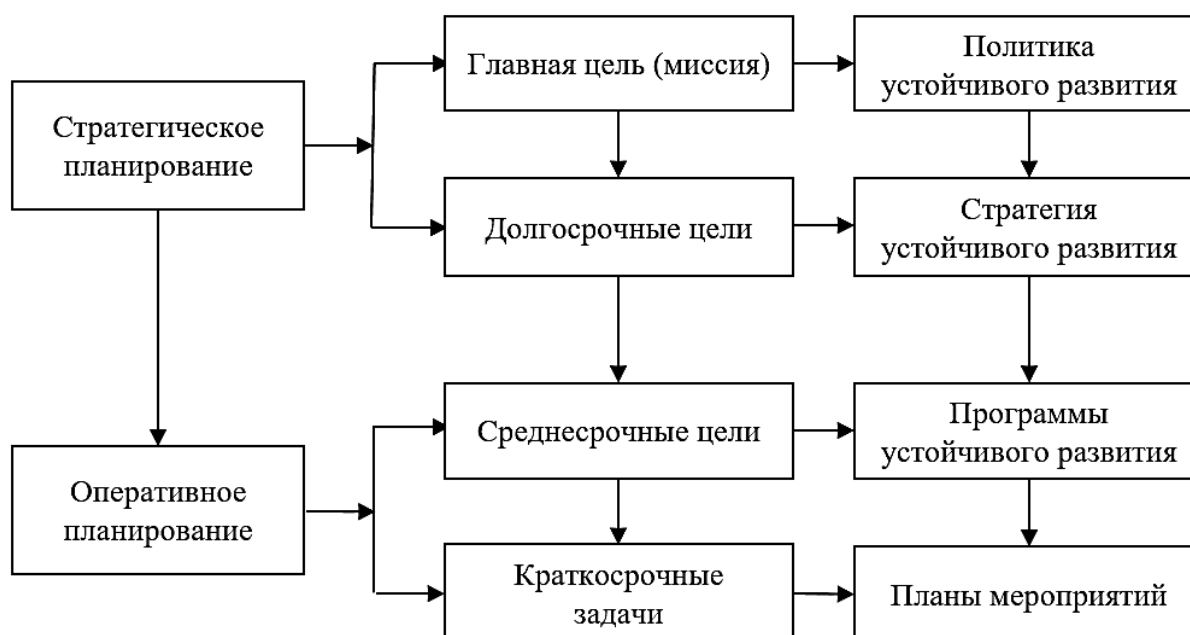


Рис. 2. Взаимосвязь стратегического и оперативного планирования
 / Fig. 2. The relationship between strategic and operational planning

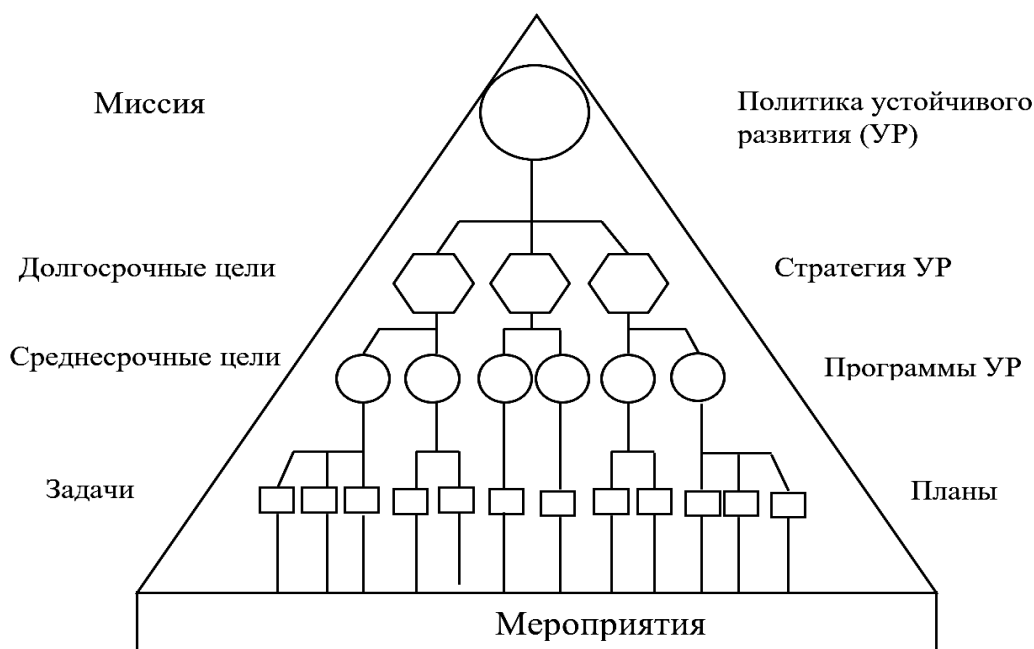


Рис. 3. Соотношение между целями, стратегией, программами и планами УР
 / Fig. 3. The correlation between the goals, strategy, programs and plans of sustainable development

При структурировании целей развития между ними соблюдается определенная иерархия. Долгосрочные цели направлены на выполнение обязательств политики и стратегии УР. Среднесрочные цели конкретизируют и уточняют достижение долгосрочной цели на определенный период времени, а задачи конкретизируют среднесрочные цели. Таким образом достигается динамическая согласованность развития территориальных образований и региона в целом.

Система мер по достижению эколого-хозяйственного баланса и УР региона включает мероприятия по охране окружающей среды и природных ресурсов, экологизацию производства, энерго- и ресурсосбережение, совершенствование существующих и переход на наилучшие доступные технологии, снижение энерго- и ресурсопотребления, повышение экологической и энергетической эффективности, учет природных и экологических факторов в производственной деятельности.

Одним из основных методов достижения рационального природопользования и УР региона является применение современных систем управления [8].

Для управления различными аспектами УР Международной организацией по стандартизации (ISO) разработаны международные стандарты в экономической и производственной деятельности, социальной сфере, области охраны окружающей среды и использования природных ресурсов.

Экономические, социальные и экологические цели УР могут быть достигнуты путем разработки и внедрения систем управления: качеством производимой продукции – ISO 9001, промышленной безопасностью и охраной здоровья – ISO 45001, энергоэффективностью и энергопотреблением – ISO 50001, социальной ответственностью – ISO 26001, экологическими аспектами – ISO 14001, устойчивым развитием – ISO 20121.

Для УР любой организации возможно поэтапное или поэтапное внедрение перечисленных выше систем управления (рис. 4).

Для управления эколого-географической составляющей УР региона могут использоваться системы экологического и энергетического менеджмента, а также системы управления промышленной и экологической безопасностью.

Важнейшей составляющей УР региона является обеспечение его экологической безопасности, которое заключается в выявлении действующих и потенциальных источников экологической опасности, их всесторонней оценке, определении возможных экологических последствий хозяйственной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, осуществлении комплекса мер по надежной защите человека, объектов экономики и природной среды от источников экологической опасности [9].

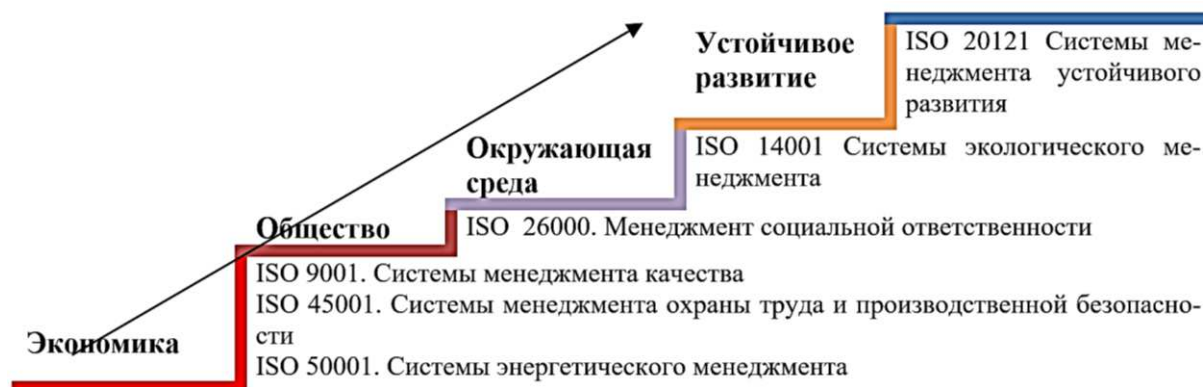


Рис. 4. Системы менеджмента для УР
/ Fig. 4. The management systems for sustainable development

Система мер по обеспечению экологической безопасности на предприятии и в регионе должна включать:

- выявление и оценку источников экологической опасности;
- мероприятия по охране окружающей среды в процессе повседневной хозяйственной деятельности;
- проекты по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов;
- мероприятия по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;
- осуществление государственного надзора и производственного контроля за соблюдением требований природоохранного законодательства, промышленной и экологической безопасности.

Еще И.П. Герасимов отмечал особую роль конструктивной географии в географическом образовании. В настоящее время, в связи с необходимостью распространения и популяризации идей УР, значение конструктивной географии и эколого-географического образования значительно возросло.

В условиях открытости образовательной системы в целом и требований образовательных стандартов большое значение имеет включение основных положений УР и конструктивной географии в образовательные программы, реализуемые на всех ступенях высшего и школьного образования, обеспечивая преемственность школьного и высшего географического образования.

К основным направлениям развития эколого-географического образования для УР можно отнести экологизацию учебных дисциплин, включение в учебные дисциплины основных положений концепции УР и конструктивной географии, подготовку учебно-методических материалов, отражающих географические и экологические аспекты УР, междисциплинарность географического образования.

Важно отметить, что именно конструктивная география позволяет реализовать модель изучения региона как интегральной географической системы. В настоящее время накоплен большой опыт создания учебно-методических пособий для различных регионов России. Но создание учебно-методического комплекса, основанного на изучении пространственной организации региона с выделением территориальных образований разного иерархического уровня, их характеристикой, позволяющей определить точки роста отдельных территорий и тренды эколого-географического, социально-экономического развития региона, в целом является новой практикой в педагогике.

Заключение

1. Конструктивная география объединяет основные направления географии: физико-географическое, экономико-географическое, эколого-географическое и изучает регион как интегральную географическую систему.

2. Такой подход позволяет рассматривать значительную часть факторов УР: экологический аспект – геоэкология и природопользование, экономический и социальные аспекты – социально-экономическая география, управленческий аспект – экологический менеджмент и управление природопользованием, образовательный и пространственные аспекты – практически все направления географии.

3. Главной целью конструктивной географии на современном этапе является информационно-аналитическое и практическое обеспечение эколого-географической составляющей УР региона.

4. К основным задачам конструктивной географии относятся интеграция результатов исследований всех направлений географии, комплексная социально-экономическая и экологическая оценка природно-антропогенных систем, определение закономерностей их формирования, планирование и разработка практических методов достижения эколого-хозяйственного баланса, рационального природопользования, экологической безопасности УР региона.

5. Особое значение конструктивной географии отводится при разработке научно-методических основ и реализации экологического и географического образования для УР региона.

Список источников

1. Основы конструктивной географии / под ред. И.П. Герасимова, В.С. Преображенского. М.: Просвещение, 1986. 287 с.
2. Хаванский А.Д., Эртель А.Б., Меринова Ю.Ю., Левченко С.В., Латун В.В., Иванченко А.М., Бессмертный И.В., Шпак Н.Н., Богачев И.В. Эколого-географический атлас Ростовской области. Ростов н/Д.: Изд-во Южного фед. ун-та, 2024. 150 с.
3. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с. EDN: YNSVPX.
4. Угольницкий Г.А. Устойчивое развитие организации. Системный анализ, математические модели и информационные технологии управления. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 320 с. EDN: JGCYJL.
5. Тишков А.А. Три века академической географии в России // Вестн. РАН. 2023. Т. 93, № 5. С. 403–414. EDN: VXCDWR. <https://doi.org/10.31857/S0869587323050109>.
6. Угольницкий Г.А. Иерархическое управление устойчивым развитием. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 336 с. EDN: QURKAL.
7. Хаванский А.Д., Латун В.В., Бессмертный И.В. Комплексная оценка пространственного развития Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 4-2. С. 90–98. EDN: BFGJOU. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-4-2-90-98>
8. Хаванский А.Д., Богачёв И.В., Хорошев О.А. Управление природоохранной деятельностью на предприятии: учеб. пособие. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во Южного фед. ун-та, 2018. 168 с. EDN: YSRNUT.
9. Хаванский А.Д., Богачёв И.В., Баян Е.М. Экологическая безопасность (методы оценки и обеспечения). Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 162 с. EDN: UWJYUJ.

References

1. Gerasimov I.P., Preobrazhensky V.S., eds. *Fundamentals of constructive geography*. Moscow: Education; 1986. 287 p. (In Russ.).
2. Khavanskii A.D., Ertel A.B., Merinova Yu.Yu., Levchenko S.V., Latun V.V., Ivanchenko A.M., Bessmertnyi I.V., Shpak N.N., Bogachev I.V. *Ecological and geographical ecological atlas of the Rostov region*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2024. 150 p. (In Russ.).
3. Danilov-Danilyan V.I., Losev K.S. *Environmental challenge and sustainable development*. Moscow: Progress-Tradition; 2000. 416 p. (In Russ.). EDN: YNSVPX.
4. Ugolnitskii G.A. *Sustainable development of the organization. System analysis, mathematical models and information management technologies*. Moscow: Physics and Mathematics Publishing House; 2011. 320 p. (In Russ.). EDN: JGCYJL.
5. Tishkov A.A. Three centuries of academic geography in Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023;93(5):403–414. (In Russ.). EDN: VXCDWR. <https://doi.org/10.31857/S0869587323050109>
6. Ugolnitskii G.A. *Hierarchical management of sustainable development*. Moscow: Physics and Mathematics Publishing House; 2010. 336 p. (In Russ.). EDN: QURKAL.
7. Khavanskii A.D., Latun V.V., Bessmertnyi I.V. Comprehensive assessment of the spatial development of the Rostov region. *Izvestiya vuzov. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(4-2):90-98. (In Russ.). EDN: BFGJOU. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-4-2-90-98>

8. Khovanskii A.D., Bogachev I.V., Khoroshev O.A. *Environmental management at the enterprise*. Rostov-on-Don, Taganrog: Southern Federal University Press; 2018. 168 p. (In Russ.). EDN: YSRNUT.

9. Khovanskii A.D., Bogachev I.V., Bayan E.M. *Environmental safety (assessment and assurance methods)*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2015. 162 p. (In Russ.). EDN: UWJYUJ.

Информация об авторах

А.Д. Хаванский – доктор географических наук, доцент, профессор кафедры социально-экономической географии и природопользования Института наук о Земле ЮФУ.

И.В. Богачев – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономической географии и природопользования Института наук о Земле ЮФУ.

А.Б. Эртель – кандидат педагогических наук, заведующая кафедрой социально-экономической географии и природопользования Института наук о Земле ЮФУ.

Ю.Ю. Меринова – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономической географии и природопользования Института наук о Земле ЮФУ.

Information about the authors

A.D. Khavansky – Doctor of Science (Geography), Associate Professor, Professor of the Department of Socio-Economic Geography and Environmental Management, Institute of Earth Sciences, SFedU.

I.V. Bogachev – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Socio-Economic Geography and Environmental Management, Institute of Earth Sciences, SFedU.

A.B. Ertel – Candidate of Science (Pedagogics), Head of the Department of Socio-Economic Geography and Environmental Management, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Yu.Yu. Merinova – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Socio-Economic Geography and Environmental Management, Institute of Earth Sciences, SFedU.

*Статья поступила в редакцию 07.05.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 07.05.2025; approved after reviewing 29.05.2025; accepted for publication 10.07.2025.*

Научная статья

УДК 631.413.3:551.345

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-122-134>

ТЕХНОГЕННЫЙ ПЕДОГАЛОГЕНЕЗ НА ТЕРРИТОРИИ АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ (ЯКУТИЯ, РОССИЯ)

Олеся Владимировна Шадринова^{1✉}, Яна Борисовна Легостаева²

^{1, 2} Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Республика Саха, Россия

¹ ovshadrinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4541-412X>

² ylego@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>

Аннотация. Приведены результаты изучения развития процессов техногенного засоления почвенного покрова в северотаежной ландшафтной провинции на примере территории разработок коренных месторождений алмазов на северо-востоке Сибирской платформы. Объекты исследования – постлитогенные почвы (криоземы, литоземы, антропогенно измененные почвы и техногенные поверхностные образования). Основные катионы и анионы, рН почв определяли в водной вытяжке 1:5, органическое вещество почвы – фотозлектрическим колориметрическим методом. Рассчитаны сумма токсичных солей и степень засоления путем связывания ионов в гипотетические соли. Установлено, что процессы техногенного засоления приобрели площадной характер и приурочены к объектам добычи и переработки горно-обогатительных комбинатов. Хлоридный и сульфатно-хлоридный тип засоления отмечается в почвах, расположенных в зоне воздействия хвостохранилищ. Для почв у отвалов пустых пород характерно сульфатное и хлоридно-сульфатное засоление. Территория исследования по содержанию токсичных солей характеризуется слабой и средней степенью преимущественно поверхностного засоления и слабой степенью деградации с отдельными участками средней и сильной степени.

Ключевые слова: техногенез, деградация почв, легкорастворимые соли, техногенное засоление, Западная Якутия, Алаakit-Мархинское кимберлитовое поле

Для цитирования: Шадринова О.В., Легостаева Я.Б. Техногенный педогалогенез на территории Алаakit-Мархинского кимберлитового поля (Якутия, Россия) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 122–134. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-122-134>

Благодарности: исследование выполнено по государственному заданию ИГАБМ СО РАН в рамках проекта НИР № FUGG-2024-0007.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

TECHNOGENIC PEDOHALOGENESIS IN THE TERRITORY OF THE ALAKIT-MARKHA KIMBERLITE FIELD (YAKUTIA, RUSSIA)

Olesya V. Shadrinova^{1✉}, Yana B. Legostaeva²

^{1, 2} Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Sakha Republic, Russia

¹ ovshadrinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4541-412X>

² ylego@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>

© Шадринова О.В., Легостаева Я.Б., 2025

Abstract. The article presents the results of studying the development of technogenic salinization of soil cover in the North Taiga landscape province using the example of the mining area of indigenous diamond deposits in the northeast of the Siberian Platform. The objects of research are postlithogenic soils – cryosols, technosols, anthropogenic-altered soils and man-made surface formations. The pH of the soils and the main cations and anions were determined in an aqueous extract of 1:5, the organic matter of the soil was determined by the photoelectric colorimetric method. The amount of toxic salts and the degree of salinity are calculated by binding ions into hypothetical salts. It has been established that the processes of technogenic salinization have acquired an areal character and are confined to mining and processing facilities of mining and processing plants. The chloride and sulfate-chloride types of salinization are confined to soils located in the affected area of tailings ponds. The soils near waste rock dumps are characterized by sulfate and chloride-sulfate salinization. The study area for the content of toxic salts is characterized mainly by a low degree of degradation with some areas of moderate and severe degree.

Keywords: technogenesis, soil degradation, easily soluble salts, technogenic soil salinization, Western Yakutia, Alakit-Markha kimberlite field

For citation: Shadrinova O.V., Legostaeva Ya.B. Technogenic Pedohalogenesis in the Territory of the Alakit-Markha Kimberlite Field (Yakutia, Russia). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):122-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-122-134>

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the implementation of the projects of the state task of the Ministry of Education of the Russian Federation FUFГ-2024-0007.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Проблема засоленных почв вызывала огромный интерес у почвоведов всего мира задолго до создания в 1924 г. Международного общества почвоведов. Еще на I Международной конференции по агрогеологии (Будапешт, Венгрия, 1909 г.) поднимался вопрос о засолении почв, нашедший отражение на всех последующих научных конференциях [1]. Согласно принятым в России представлениям, к засоленным относятся почвы, содержащие хотя бы в одном горизонте почвенного профиля в пределах 2 м легкорастворимые соли в количестве, превышающем пороги токсичности [2]. Признано, что засоление почв является причиной деградации земель, приводящей к локальным процессам опустынивания [3], и оказывает сильное влияние на микробные и биохимические свойства почвы [4–6]. С развитием современных экологических исследований становится все более очевидным, что засоление почв в XXI в. – это угроза не только для сельского хозяйства, но и для всей окружающей среды [7].

В России процессы засоления и рассоления в почвах рассматривались и выделялись многими исследователями [8–12], в том числе и на территории с наличием мерзлоты [13, 14]. Первое упоминание о засоленных почвах Якутии зафиксировано в трудах Каяндера (1903 г.), описавшего травянистые ассоциации засоленных степных низин на левобережье р. Лены. Более точные сведения о почвах Якутии стали накапливаться с 1948 г. в связи с планомерным изучением почвенного покрова Якутским филиалом АН СССР. Получены описания морфологии и химического состава различных засоленных почв Центральной, Юго-Западной и Западной Якутии [15]. Изучение засоленных почв Якутии довольно активно проводилось во второй половине XX в. [15–17]. Выделены засоленные площади сельскохозяйственных угодий в долинном комплексе среднего течения р. Лены и ее левого притока р. Вилюй, на надпойменных террасах, в пределах которых засоление развивается в результате процессов аласного седиментоза, в узкой полосе вдоль побережья северных морей – Лаптевых и Восточно-Сибирского.

В настоящее время актуальной проблемой для территории Якутии является активное развитие процессов техногенного засоления, которое приобрело уже масштабный характер. Интенсивная разработка и эксплуатация алмазных и нефтегазовых месторождений неизбежно приводят к деградации таежных экосистем, центральным звеном которых служит почва. Развитие процессов

техногенного засоления почвенного покрова, повсеместно сопровождающих геолого-разведочные и добычные работы, – один из геоэкологических факторов, маркирующих деградацию почв в зонах прямого и опосредованного воздействия различных объектов инфраструктуры геологических и горнодобывающих предприятий.

В данной статье представлены результаты изучения процессов техногенного засоления почв и грунтов на территории разработки коренных месторождений алмазов в районе сплошного распространения многолетнемерзлых пород в Республике Саха (Якутия).

Материалы и методы исследования

Исследования проводятся в Средней Сибири (западная часть Республики Саха (Якутия), Россия), в пределах Якутской алмазоносной провинции Алаakit-Мархинского кимберлитового поля, на территории промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината (АГОК), вблизи пгт Айхал (65°56' с.ш. и 111°29' в.д.), вокруг которого в радиусе до 27 км находятся 5 промышленно-алмазоносных кимберлитовых трубок: «Юбилейная», «Заря», «Айхал», «Сытыканская» и «Комсомольская». Последние два объекта на данный момент отработаны, месторождение Айхал с 1997 г. переведено на подземный способ добычи.

В основу фактического материала положены полевые и лабораторные исследования (2019–2023 гг.). Объекты – почвы и грунты промышленной площадки АГОК. Опробование проводилось в августе 2019, 2023 гг. методом ключевых участков в привязке к промышленным объектам инфраструктуры по профилно-генетическому признаку со всех почвенных горизонтов до границы сезонно-талого слоя. Общий объем выборки составляет 243 почвенных образца. Типы почв установлены в соответствии с классификацией почв России.

Все анализы выполнены в Институте геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. Образцы высушены и просеяны через сито с ячейей диаметром 1 мм. Степень засоления почв определена по содержанию токсичных солей [18]. Анализировался состав ионов CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ в водной вытяжке (1:5) (аналитики А.М. Романова, Н.В. Свинобова, Д.В. Софронова). pH почвы измеряли в суспензии почва: вода (1:5) при комнатной температуре на pH-метре (Metler Toledo Seven Compact Advanced) по ГОСТ 26423-85. Органический углерод почвы определяли по ГОСТ 26213-2021, для горизонтов с большим количеством плохо разложившихся растительных остатков вычисляли потерю при прокаливании.

Обработка результатов и корреляционный анализ проводили с помощью программы STATISTICA 10. Карты-схемы площадного распределения построены в пакете программ Surfer-13 с применением метода интерполяции kriging.

Характеристика природно-климатических условий почвообразования

В региональном тектоническом плане территория находится в области сочленения двух крупных структур Сибирской платформы (северо-восточный борт Тунгусской синеклизы и юго-западное крыло Анабарской антеклизы), осложненной системой Далдыно-Оленекской зоны разломов, кимберлитовым и трапповым магматизмом [19]. Рельеф траппового плато-холмисто-пологоувалистый с абсолютными отметками урезом и высот от 299 до 802 м. В геологическом строении залежи каменных солей отсутствуют [20]. Ландшафты относятся к Верхневилуйской столово-останцевой провинции северотаёжных редкостойных кустарничково-мохово-лишайниковых лиственничников в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород [21]. Климат экстроконтинентальный с продолжительной зимой и коротким летом, среднегодовая температура равна $-12,2$ °С, среднегодовая сумма выпадаемых осадков – 300,1 мм, сумма испаряемости – 346,1 мм, коэффициент увлажнения – 0,88 [22].

В почвенном покрове на водораздельном пространстве Марха-Далдынского междуречья доминируют криоземы [23]. Литоземы и карболитоземы (горные примитивные почвы) занимают подчиненное положение в структуре почвенного покрова и формируются на верхних частях пологих склонов. Исследуемые почвы относятся к стволу постлитогенных и характеризуются мелкопрофильностью (до 30 см), сильной щебнистостью, слабой дифференцируемостью почвенного

профиля, с признаками тиксотропности и криотурбационного перемешивания. В почвенном профиле, как правило, присутствует льдистая или сухая мерзлота. Техногенные отложения сформированы грунтами отвалов вскрыши и пустых пород, а также отложениями хвостохранилищ и отстойников оборотного водоснабжения обогатительных фабрик.

Анализ природно-климатических факторов региона и морфологических характеристик почвенных профилей установил отсутствие предпосылок для развития в условиях природных ненарушенных ландшафтов процессов засоления.

Результаты исследования и обсуждение

Характеристика объектов исследования. По характеру воздействия и степени преобразованности профиля почвы территории прямого и опосредованного воздействия объектов горно-обогатительного комбината условно разделены на четыре группы (рис. 1).

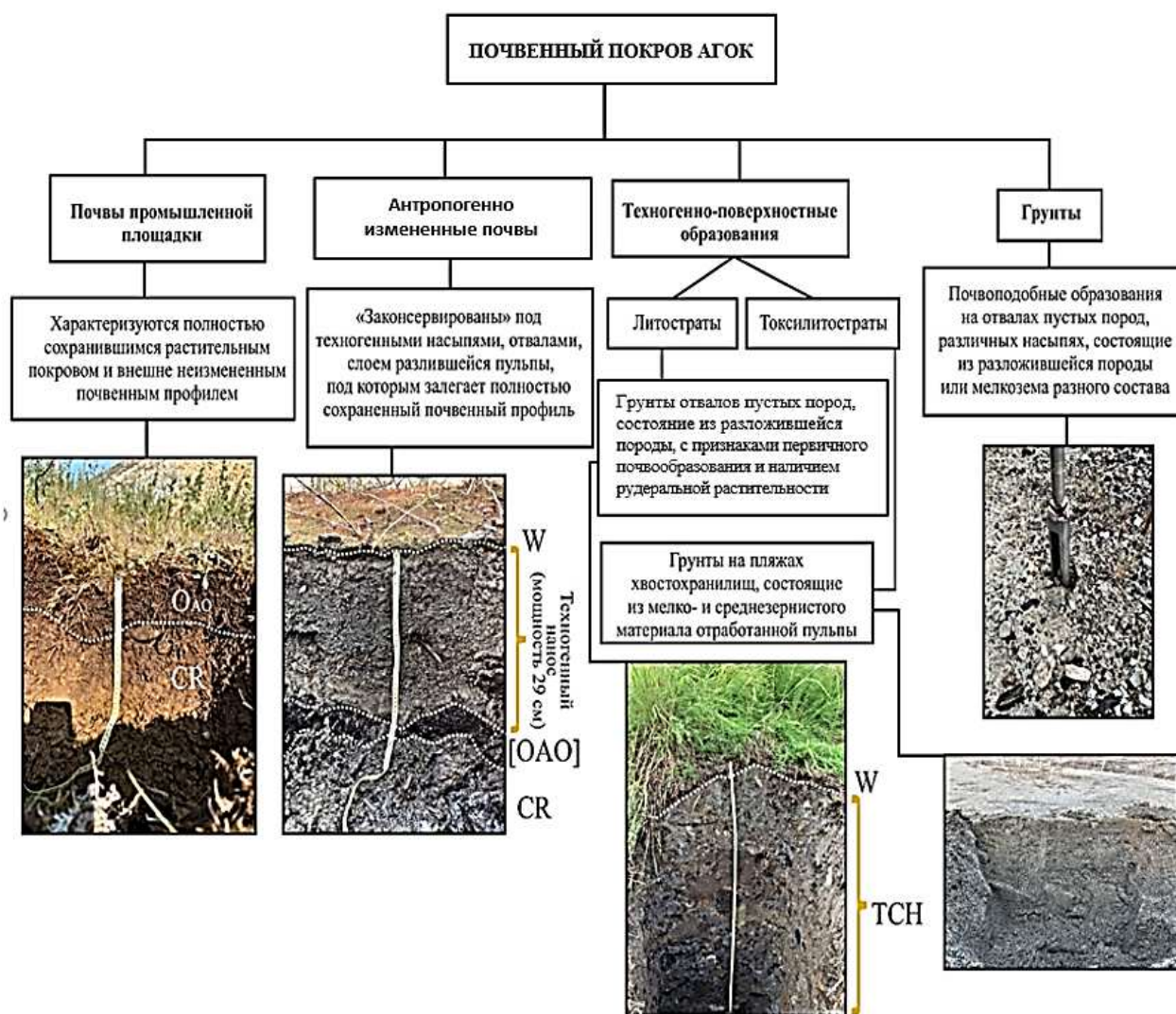


Рис. 1. Почвенный покров территории промышленной площадки АГОК
 / Fig. 1. Soil cover of the territory of the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Plant

Почвы природных ландшафтов характеризуются нейтральной реакцией среды, достаточно высоким содержанием органического вещества, невысоким содержанием всех водорастворимых ионов, отсутствием засоления (табл. 1). Криоземы формируются в нижних частях склонов долин основных водотоков на породах нижнего ордовика олдонинской свиты, сохолохской свиты вдоль речных долин в виде узкой полосы, на пониженных водораздельных участках, породах триаса и перми в средних частях склонов и на водораздельных пространствах.

Таблица 1 / Table 1

Усредненные показатели химических свойств почв промышленной площадки АГОК / Average indicators of chemical properties of soils at the Aykhal Mining and Processing Plant industrial site

Тип почвы	рН	Сорг, %	Водорастворимый комплекс, смоль(экв)/100 г \pm Сv*						S _{токс} , %
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	
Природные ландшафты	7,2 \pm 0,5	8,7 \pm 6,5	0,5 \pm 0,2	0,5 \pm 0,1	0,3 \pm 0,4	0,6 \pm 0,2	0,4 \pm 0,2	0,3 \pm 0,2	0,04 \pm 0,02
Промпло- щадки, n=22	6,7 \pm 0,7	7,3 \pm 7,1	0,48 \pm 0,2	1,11 \pm 1,2	2,20 \pm 0,9	1,27 \pm 1,0	0,75 \pm 0,4	1,77 \pm 0,9	0,23 \pm 0,1
Антропогенно измененные, n=13	7,8 \pm 0,4	4,1 \pm 6,9	0,81 \pm 0,3	0,68 \pm 2,7	2,12 \pm 0,9	1,41 \pm 0,8	0,79 \pm 0,4	1,86 \pm 1,9	0,24 \pm 0,2
Литостраты, n=32	7,2 \pm 0,8	2,9 \pm 3,6	0,4 \pm 0,2	0,4 \pm 0,2	2,1 \pm 1,4	1,3 \pm 0,8	0,6 \pm 0,3	1,0 \pm 0,6	0,1 \pm 0,1
Грунты хвосто- хранилищ, n=16	8,3 \pm 0,6	1,0 \pm 0,5	0,55 \pm 0,16	0,93 \pm 0,6	2,85 \pm 0,8	1,73 \pm 0,5	0,86 \pm 0,2	1,73 \pm 0,6	0,23 \pm 0,06
Грунты, n=20	7,8 \pm 0,8	4,8 \pm 7,3	0,59 \pm 0,4	0,41 \pm 0,18	3,02 \pm 2,0	1,27 \pm 1,1	0,77 \pm 0,4	1,98 \pm 1,0	0,26 \pm 0,1

* – Сv – стандартное отклонение.

Криоземы (О-CR-C) характеризуются сочетанием двух или трех минеральных криотурбированных горизонтов с четко выраженным аккумулятивно-гумусовым горизонтом. Содержание органического вещества в верхних органогенных горизонтах – до 6 %, ниже по профилю – до 2,95 %. Среди водорастворимых солей преобладают ионы кальция и сульфаты.

Литозем грубогумусовый типичный АО-(С)-М формируется на каменистых развалах нижне-триасовых туфопесчаников и туфоалевролитов нерасчлененных образований перми и триаса в верхних частях склонов и водораздельных пространствах. Почва мелкопрофильная, сильнощебнистая, с достаточно однородным внутрипрофильным распределением основных ионов и нейтральной реакцией среды. Местами встречаются литоземы с органогенным горизонтом мощностью всего 2–5 см, под которым залегает плитняк подстилающих пород.

Карболитозем перегнойный Н-(С)-M_{Ca} залегает на карбонатных и терригенно-карбонатных породах среднего ордовика и нижнего силура узкой полосой в средних частях склонов долин рек Марха, Моркока, Алакит, Сохолох и Сытыкан. Почвы вскипают в минеральной части профиля, характеризуются высоким содержанием органического углерода (до 14 %) в верхних горизонтах с убыванием вниз по профилю (до 1,5 %), реакция среды 7,4 с поверхности до 7,8 в нижних частях профиля.

Антропогенно измененные почвы характеризуются наличием дополнительного слоя, на котором, в зависимости от времени, состава и условий залегания, с поверхности может начаться процесс гумусообразования. В случае их активизации почвы приобретают два органогенных горизонта – новый и погребенный. Антропогенно измененные почвы расположены в непосредственной близости от отвалов пустых пород, техногенных насыпей, образуются в результате механического перемещения материала или разливов трубопроводов. Далее рассмотрим три разреза, образованных под воздействием разных факторов.

Криозем перегнойный антропогенно измененный (разрез А-10/4) сформирован при прорыве пульповода с захоронением природного почвенного профиля, расположен в лиственничном редколесье в 300 м от отвала карьера трубки «Комсомольская». На поверхности образовался нанос мощностью до 3,5–5 см, состоящий из влажной серо-сизой глины. Реакция среды в верхнем горизонте щелочная, меняющаяся к нейтральной с глубиной почвенного профиля. На поверхности наносного горизонта образовалась солевая корочка. В водорастворимом комплексе отмечена высокая концентрация практически всех основных ионов с резким понижением их содержания вниз по почвенному профилю. Характеризуется хлоридным типом засоления с вариациями от очень сильной степени на поверхности к средней и слабой – в нижних горизонтах. Растительность практически отсутствует, единичные экземпляры бескильницы Гаупта (*Puccinellia hauptiana* V. Krecz) сильно угнетены.

Криозем грубогумусированный артистратифицированный (антропогенно измененный разрез А-68) расположен между отвалами трубки «Юбилейная». Мощность перекрывающего антропогенного горизонта – 10–12 см. На его поверхности сформирована маломощная моховая подушка высотой до 1 см. Отмечается развитие напочвенного растительного покрова, активное зарастание подростом ольховника кустарникового (*Duschekia fruticosa* (Rupr.)) и лиственницы гмелина (*Lárix gmélinii*). Материал перекрытия – сильно влажный, плотный, сизый, глинистый, характеризующийся щелочной рН. Образования солевой корочки на поверхности не наблюдается. Выявлена некоторая аккумуляция сульфатов, кальция, калия и натрия в органогенном горизонте на глубине 13–20 см, что согласуется с распределением почвенной органики по профилю. Зафиксирован сульфатный тип слабой и средней степени засоления.

Криозем перегнойный артистратифицированный (А-61/1) расположен вниз по пологому склону на границе живого и мертвого леса, сформирован в результате разлива пульповода на территории хвостохранилища обогатительной фабрики № 14. Материал перекрытия – крупнозернистый кимберлитовый песок. На участке присутствуют погибшие и живые, но сильно угнетенные деревья лиственницы гмелина (*Lárix gmélinii*), ива белая (*Salix alba* L.), пушица влагалищная (*Erióphorum vaginátum*), кипрей узколистный (*Chamérion angustifólium* (L.)), хвощ полевой (*Equisétum arvénsе* L.), мятлик однолетний (*Poa annua* L.) и осока острая (*Carex ocuta* L.).

Вышеприведенные примеры антропогенно измененных почв позволяют сделать вывод о значимости характера материала консервации или перекрытия. В первом разрезе (т.н. А-10/4) наблюдается относительно маломощный (до 5 см) техногенный горизонт, состоящий из пульпы, с более высокой концентрацией токсичных солей, в отличие от второго разреза (т.н. А-68), в котором мощность горизонта перекрытия больше 10 см, но на нем идут активные процессы самозарастания. Материал наноса с отвалов пустых пород представляет собой менее токсичный по сравнению с грунтами хвостохранилищ продукт выветривания. Поэтому в антропогенно измененных почвах, расположенных в зоне воздействия отвалов, отмечается достаточно высокая степень зарастания рудеральными растительными сообществами с общим проективным покрытием до 100 %. Антропогенно измененные почвы могут служить источником вторичного засоления в пределах почвенного покрова промплощадки.

Техногенно-поверхностные образования представлены литостратами и токсилитостратами. Литостраты сформированы на склонах южной и юго-западной экспозиции отвалов пустых пород или на участках, где проведены мероприятия горнотехнического этапа рекультивации. Отмечено формирование разнотравных рудеральных сообществ, в целом активно развиваются процессы самозарастания. В некоторых случаях встречаются начальные стадии формирования дернины. Литостраты слабо засолены и имеют преимущественно сульфатный, местами в нижних горизонтах хлоридно-сульфатный тип засоления. Реакция среды – от нейтральной до щелочной. В водорастворимом комплексе после сульфатов на втором месте – кальций, наличие которого обусловлено сложением отвалов пустых пород.

В грунтах хвостохранилищ (токсилитостраты) отмечаются преимущественно хлоридно-сульфатный и хлоридный типы засоления, от слабой до средней степени. Реакция среды – сильнощелочная равномерная по всему профилю. В водорастворимом комплексе грунтов отвалов и хвостохранилищ доминируют сульфаты, ионы калия и натрия, в сильнозасоленных почвах и грунтах на первую позицию выходят ионы SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ и Cl^- .

Развитие процессов засоления. На территории исследования преобладает сульфатный и хлоридно-сульфатный тип засоления. Сильным засолением отличались образцы почв, находящихся у хвостохранилищ. Очень сильная степень засоления в антропогенно измененных почвах промышленной площадки. По химизму засоления сульфатный, хлоридно-сульфатный и сульфатно-хлоридный типы отмечаются в техногенно-поверхностных образованиях, в почвах, расположенных у бортов карьеров, грунтах и вдоль автомобильных дорог промышленной площадки: хлоридный тип – в зоне воздействия хвостохранилищ. Более 80 % всех образцов почв и грунтов промышленной площадки превышают предел токсичности по содержанию ионов хлора, единично выявлены точки с увеличением порога токсичности в 20 раз и более. Максимальные концентрации зафиксированы на территории действующих промышленных объектов АГОК в почвах, находящихся в пониженных элементах рельефа и испытывающих максимальную техногенную нагрузку в виде наносов, вызывающих погребение и загрязнение природной почвы путем выщелачивания ионов солей из техногенных отвалов и разлившейся пульпы. В отдельных случаях на поверхности образуется солевая корочка (рис. 2а). Концентрация хлоридов в подобных почвах достигает 10 смоль(экв)/кг.

Накопление хлоридов в почвах и грунтах происходит как на поверхности, так и в нижних горизонтах, что свидетельствует о их высокой подвижности.

Почвы природных ландшафтов территории исследования характеризуются гомогенным, слабодифференцированным на генетические горизонты профилем, с практически равномерным распределением солей (рис. 2б).



a/a

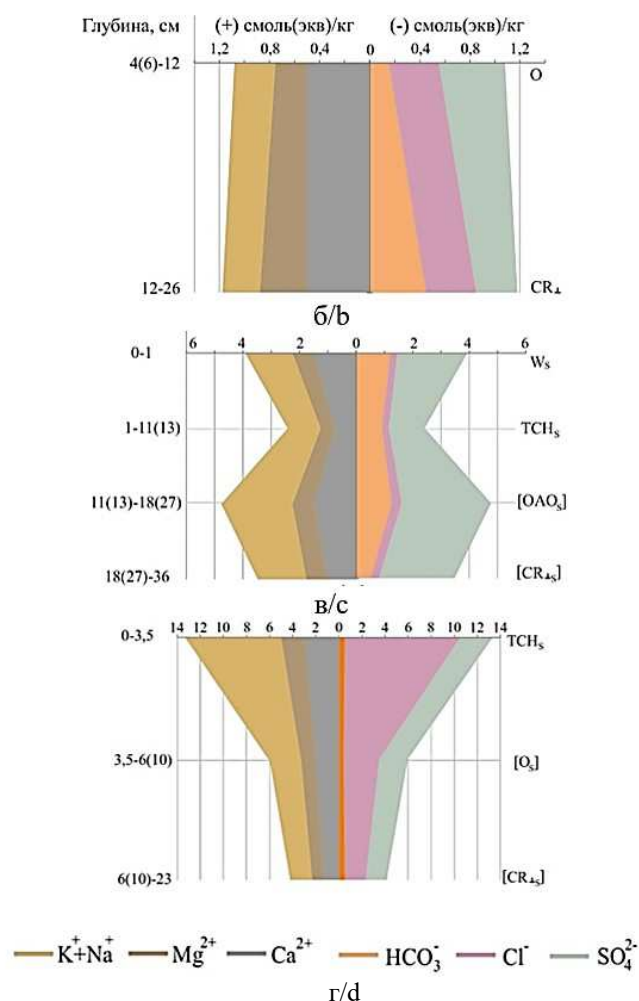


Рис. 2. Засоленные почвы с образованием солевой корочки на поверхности трубки «Комсомольская» (а) и солевые профили почв: б – фоновая; в – антропогенно измененная почва сульфатного типа средней степени засоления; г – антропогенно измененная хлоридного типа засоления с вариациями от очень сильной степени с поверхности до средней и слабой – в нижних горизонтах / Fig. 2. Saline soils with the formation of a salt crust from the surface on the territory of the Komsomolskaya kimberlite pipe (a) and salt profiles of soils: b - background soil; c - anthropogenic-modified sulfate-type soil of medium degree of salinity; d - anthropogenic-modified chloride-type soil with variations from a very strong degree on the surface to medium and slight - in the lower horizon

В импактных зонах горнодобывающих предприятий формируется совершенно другой солевой профиль с аккумуляцией легкорастворимых солей как с поверхности, так и на уровне погребенных органогенных горизонтов (рис. 2в, г). Так как соли являются динамичной системой, в период выпадения атмосферных осадков с влагой они могут мигрировать в нижние горизонты профиля и латерально по поверхности многолетнемерзлых пород в подчиненные формы рельефа, затем в период отсутствия дождей подтягиваться вверх. Во всех почвах исследуемой территории с выявленным развитием процессов засоления в условиях долгого отсутствия атмосферных осадков отмечается поверхностная аккумуляция солей с последующей миграцией вниз по почвенному профилю. В результате испарительной концентрации и сорбции гумусовыми веществами происходит некоторая аккумуляция на глубине 10–30 см.

Таким образом, ионно-солевой профиль почв с ненарушенным последовательным строением генетических горизонтов в зонах прямого техногенного воздействия характеризуется, как правило, ярко выраженным поверхностным накоплением или двумя зонами аккумуляции. В антропогенно измененных почвах основные солеобразующие ионы могут концентрироваться на двух или трех уровнях, включая при отсутствии повышенного увлажнения надмерзлотный горизонт.

Для стандартизации количественных характеристик проведен корреляционный анализ на основе линейной связи с расчетом коэффициента корреляции Пирсона ($r < 0,05$). Созданы две общие выборки, характеризующие взаимосвязи водорастворимого комплекса в криоземах и литоземах. Всего образовалось 90 корреляционных пар (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Зависимость содержания основных ионов от вариации значений pH и $C_{орг}$ в криоземах и литоземах
/ Dependence of the content of basic ions on the variation of pH and $C_{орг}$ values
in Cryosols and Leptosols**

Показатель	$C_{орг}$	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+Na^+	$S_{токс.}$
Криоземы, n=25									
$C_{орг}$	1,00								
pH	-0,54	1,00							
HCO_3^-	-0,09	0,50	1,00						
Cl^-	0,75	0,34	0,22	1,00					
SO_4^{2-}	-0,10	0,34	0,08	0,54	1,00				
Ca^{2+}	-0,11	0,48	0,31	0,81	0,73	1,00			
Mg^{2+}	-0,24	0,54	0,33	0,85	0,76	0,89	1,00		
K^+Na^+	-0,19	0,24	0,20	0,81	0,68	0,53	0,68	1,00	
$S_{токс.}$	-0,21	0,30	0,23	0,81	0,74	0,59	0,75	0,99	1,00
Литоземы, n=11									
$C_{орг}$	1,00								
pH	0,33	1,00							
HCO_3^-	0,79	0,59	1,00						
Cl^-	0,20	0,44	0,14	1,00					
SO_4^{2-}	-0,10	-0,33	-0,49	0,04	1,00				
Ca^{2+}	0,53	0,60	0,38	0,37	-0,15	1,00			
Mg^{2+}	0,21	0,47	0,02	0,49	0,21	0,82	1,00		
K^+Na^+	0,03	-0,31	-0,23	0,08	0,88	-0,40	-0,12	1,00	
$S_{токс.}$	0,06	-0,26	-0,22	0,11	0,91	-0,33	-0,03	1,00	1,00

В криоземах выявлена средняя и высокая степень корреляции для основных ионов. В литоземах отмечен избирательный характер взаимосвязей с преобладанием слабой и очень слабой зависимости по абсолютным значениям модуля. На основании полученных данных можно сделать вывод, что с увеличением содержания ионов хлора, натрия и калия в водорастворимом комплексе почв с ненарушенным почвенным профилем в зоне прямого техногенного воздействия увеличивается сумма токсичных солей, соответственно, степень засоленности почв.

Практически во всех исследуемых разрезах криоземов имеется значимая корреляция хлоридов с содержанием почвенной органики. Подобное поведение хлоридов прослеживается также в антропогенно измененных почвах, где максимальная концентрация Cl^- отмечается в погребенном органогенном горизонте. Коэффициент корреляции с органическим веществом в них колеблется от $r=0,7$ до 1,0. Определение органического углерода основано на окисляемости органического вещества, в том числе и углеродов техногенной составляющей (топливо, смазочное масло и др.). Вероятно, высокая корреляция хлоридов с органическим веществом обусловлена привнесением в почвенный покров техногенных наносов, которые одновременно служат источником хлоридов и углеводов. Отмечаемая значимая корреляция при этом является случайной ввиду наличия третьего фактора (техногенного), от которого зависят обе исследуемые величины [24–26].

В целом увеличение общей концентрации ионов сульфатов и токсичных ионов сульфатов наблюдается в зоне воздействия отвалов пустых пород на площадках разработки кимберлитовых трубок (рис. 3а, б), хлоридный тип засоления и увеличение концентрации хлоридов – в зоне воздействия хвостохранилищ (рис. 3в). Это обусловлено тем, что в хвостохранилища свозят высокоминерализованные воды с минерализацией до 60 г/л хлоридного состава [27].

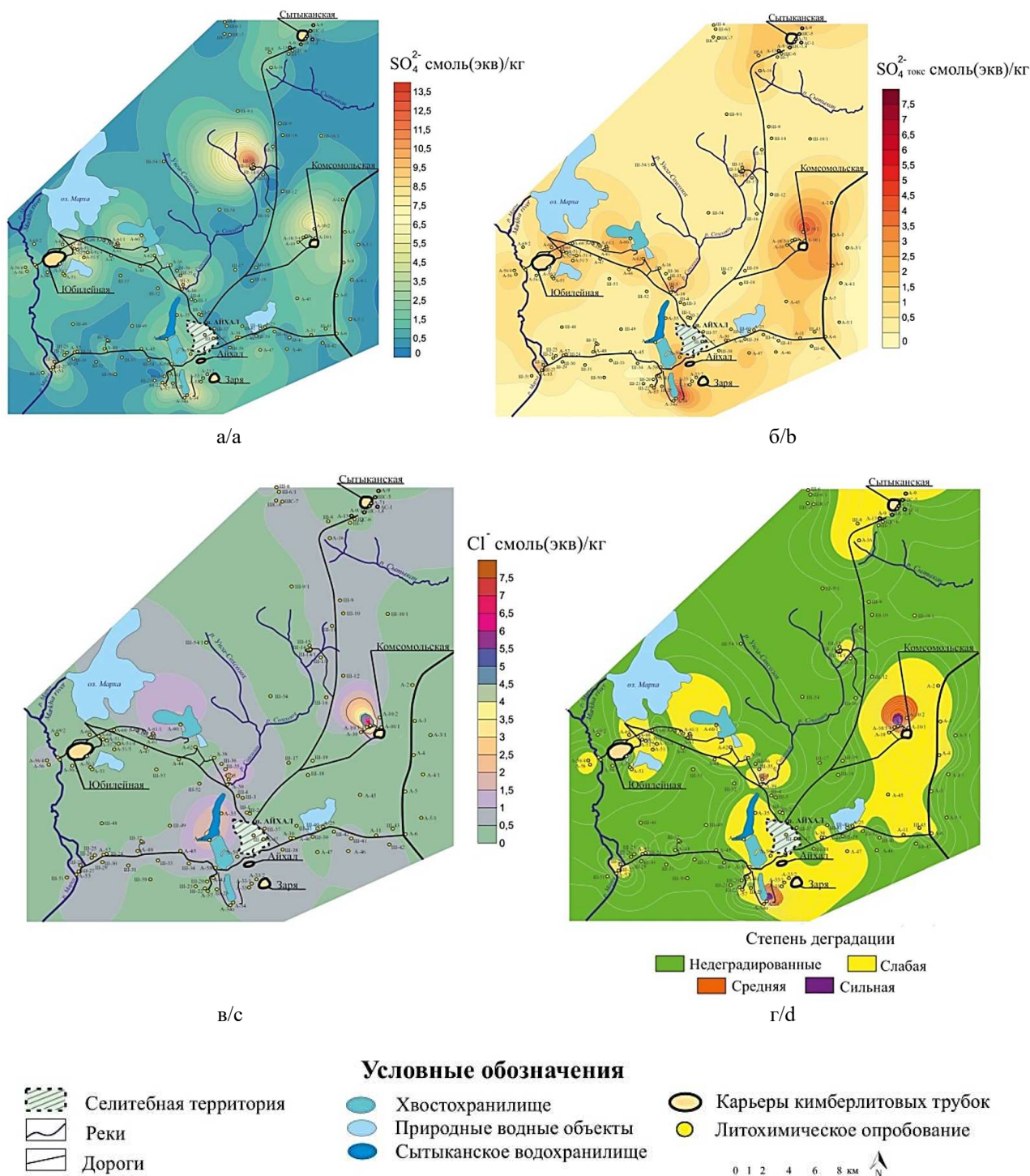


Рис. 3. Карта-схема поверхностного распределения на территории промышленной площадки АГОК: а – ионов сульфатов; б – токсичных ионов сульфатов; в – хлоридов; г – степень деградации / Fig. 3. Map-scheme of the surface distribution on the territory of the Aykhal Mining and Processing Plant industrial site: a - sulfate ions; b - toxic sulfate ions; c - chlorides; d - degree of land degradation

Согласно [28], определение степени деградации земель вследствие засоления производится путем оценки содержания суммы токсичных солей в гумусовом слое, %: < 0,1 – недеградированные; 0,1–0,25 – слабodeградированные; 0,26–0,5 – среднедеградированные; 0,51–0,8 – сильнодеградированные; более 0,8 – очень сильнодеградированные (разрушенные). Проведенный анализ пространственного содержания токсичных солей (рис. 3г) характеризует территорию как слабodeградированную, с отдельными участками среднедеградированных и сильнодеградированных почв на территории воздействия хвостохранилищ и в местах аварийного разрыва пульповода. Стоит отметить, что наличие сплошного распространения многолетнемерзлых пород препятствует вымыванию поступающих солей с объектов складирования отходов добычи и обогащения из почвенного профиля. И при дальнейшей эксплуатации месторождений неизбежно увеличение накопления токсичных солей в почвах без возможности их выноса, с аккумуляцией в пониженных формах рельефа, что создает отдельные риски загрязнения среды и накопления экологического ущерба.

Таким образом, маркером техногенного воздействия на почвенный покров является активное развитие процессов засоления почв, подвергшихся прямому техногенному воздействию, и формирование новых почвоподобных образований – потенциальных источников вторичного засоления в результате миграции солей в сопряженные ландшафты.

Заключение

Распространение засоления на территории Алакит-Мархинского кимберлитового поля приобретает площадной характер. Территория промышленной площадки АГОК характеризуется сплошным распространением засоления слабой и средней степени. В почвах в зоне воздействия отвалов пустых пород формируется преимущественно сульфатный и хлоридно-сульфатный типы засоления, в районе хвостохранилищ, куда складировются высокоминерализованные воды (с минерализацией до 60 г/л) хлоридного состава, – сульфатно-хлоридный и хлоридный.

Почвенный покров промышленной площадки АГОК по анализу содержания и площадного распределения суммы токсичных солей характеризуется слабой степенью деградации с локальными участками средней и сильной степени.

Активная эксплуатация алмазных месторождений привела к формированию техногенных массивов, которые представляют собой хранилища потенциально опасных соединений, находящихся в инертной и подвижной формах. На фоне природных геохимических аномалий, объективно связанных с внедрением кимберлитового магматизма, становится возможным выделение аномалий техногенного происхождения, маркером которых в почвах на уровне ионно-солевого баланса является активное развитие процессов поверхностного засоления.

Список источников

1. Редли М. Вклад подкомиссии засоленных почв международного общества почвоведов в изучение щелочных и засоленных почв мира // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1270–1278. EDN: OFRKWV.
2. Панкова Е.И., Горохова И.Н. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI века // Бюл. Почв. ин-та. им. В.В. Докучаева. 2020. № 103. С. 5–33. EDN: UYLVON. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>
3. Salvati L., Ferrara C. The local-scale impact of soil salinization on the socioeconomic context: An exploratory analysis in Italy // CATENA. 2015. Vol. 127. P. 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.008>
4. Андронов Е.Е., Петрова С.Н., Пинаев А.Г., Першина Е.В., Рахимгалиева С.Ж., Ахмеденов К.М., Горобец А.В., Сергалиев Н.Х. Изучение структуры микробного сообщества почв разной степени засоления с использованием Т-RFLP и ПЦР с детекцией в реальном времени // Почвоведение. 2012. № 2. С. 173–183. EDN: OOWLPD.
5. Meena M.D., Joshi P.K., Jat H.S., Chinchmalatpure A.R., Narjary B., Sheoran P., Sharma D.K. Changes in biological and chemical properties of saline soil amended with municipal solid waste compost and chemical fertilizers in a mustard-pearl millet cropping system // CATENA. 2016. Vol. 140. P. 1–8. EDN: WOVXSV. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.009>
6. Yan N., Marschner P. Microbial activity and biomass recover rapidly after leaching of saline soils // Biol. Fertil. Soils. 2013. Vol. 49. P. 367–371. EDN: LTSPBT. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0733-y>
7. Редли М., Панкова Е.И. Результаты современных исследований засоленных почв в Европе // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1473–1485. EDN: OWRHRR.

8. Воробьева Л.А., Панкова Е.И. Щелочные засоленные почвы России // Почвоведение. 2008. № 5. С. 517–532. EDN: НОАQKN.
9. Лопатовская О.Г. Засоленные почвы Приольхонья и острова Ольхон. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2018. 205 с. EDN: YQGURF.
10. Котенко М.Е., Зубкова Т.А., Баламирзоев М.А. Электрическое сопротивление почв Присулакской низменности Республики Дагестан // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2009. № 6 (154). С. 84–88. EDN: LACKUL.
11. Засоленные почвы России / отв. ред. Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова. М.: Академкнига, 2006. 854 с. EDN: YHNJH.
12. Симонова Ю.В., Русаков А.В., Коркина Е.А. Процессы засоления почв импактной зоны выходов минерализованных вод в Ярославском Поволжье // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2020. № 65 (4). С. 662–680. EDN: URSSSC. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.404>.
13. Brouchkov A. Salt and water transfer in frozen soils induced by gradients of temperature and salt content // Permafrost Periglac. Process. 2000. Vol. 11. P. 153–160. EDN: LGBWNL. [https://doi.org/10.1002/1099-1530\(200004/06\)11:2<153::AID-PPP344>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1099-1530(200004/06)11:2<153::AID-PPP344>3.0.CO;2-Y)
14. Черноусенко Г.И. Засоленные почвы котловин юга Восточной Сибири. М.: МАКС Пресс, 2022. 480 с. EDN: HENGMU.
15. Еловская Л.Г., Коноровский А.К., Саввинов Д.Д. Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии. М.: Наука, 1966. 275 с.
16. Зольников В.Г., Еловская Л.Г., Тетерина Л.В., Черняк Е.И. Почвы бассейна Вилюя и их использование. Якутск: Изд-во АН СССР, 1962. 204 с.
17. Коноровский А.К. Солевой режим засоленных почв долины Лены: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск: Иркутский гос. ун-та им. А.А. Жданова, 1967. 30 с.
18. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. Т. 1: Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохоз. угодий / под ред. Э.Н. Молчанова. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. 756 с. EDN: RXZICJ.
19. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Структурно-тектонические критерии поисков кимберлитовых тел в Алакит-Мархинском поле // Руды и металлы. 2019. № 2. С. 55–60. EDN: YHZBPO. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10014>
20. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:200 000. Серия верхневилуйская. Лист Q-49-XXI, XXII (Айхал). Объяснительная записка / под ред. В.С. Гриненко. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 284 с.
21. Данилов Ю.Г., Федоров А.Н., Дегтева Ж.Ф., Горохов А.Н., Варламов С.П., Мурзин Ю.А. Ландшафты Якутии. Якутск: Изд-во СВФУ, 2016. 75 с.
22. Шадринова О.В. Анализ климатических факторов в аспекте развития процессов засоления в почвах северотаежных ландшафтов // Вестн. Воронежского гос. ун-та. География. Геоэкология. 2024. № 2. С. 90–99. EDN: TRIEXO. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/2/90-99>
23. Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г. Особенности распределения микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон на участках алмазодобычи на северо-западе Сибирской платформы // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 9. С. 142–153. EDN: PLXWDE. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3364>
24. Безулова О.С., Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Морозов И.В. Влияние высоких концентраций металлов на гумусное состояние и биологическую активность чернозема обыкновенного // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 1999. № 2. С. 65–71. EDN: ZHIPUT.
25. Панкратова К.Г., Щелоков В.И., Сазонов Ю.Г. Определение содержания гумуса при загрязнении почв нефтепродуктами // Плодородие. 2007. № 4 (37). С. 20–21. EDN: KUCKKH.
26. Прохорова Н.В. Эколого-геохимическая роль автотранспорта в условиях городской среды // Вестн. Самарского гос. ун-та. Естеств. серия. 2005. № 5 (39). С. 188–199. EDN: GXOMCN.
27. Янников А.М., Янникова С.А., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю. Перспективы использования глубоко-залегающих водоносных горизонтов для закачки слабоминерализованных вод // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 76–81. EDN: NFNTHV. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-76-81>
28. О методике определения размеров ущерба от деградации почв и земель: письмо Роскомзема от 29.07.1994 № 3-14-2/1139. URL: <https://rulaws.ru> (дата обращения: 17.01.2025).

References

1. Redli M. Contribution of the subcommittee of saline soils of the international society of soil scientists to the study of alkaline and saline soils of the world. *Eurasian Soil Science*. 2011;(10):1270-1278. (In Russ.). EDN: OFRKWV.

2. Pankova E.I., Gorokhova I.N. Analysis of information about the alkaline soil areas in Russia at the end of the 20th and beginning of the 21st century. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2020;(103):5-33. (In Russ.). EDN: UYLVVOH. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>
3. Salvati L., Ferrara C. The local-scale impact of soil salinization on the socioeconomic context: An exploratory analysis in Italy. *CATENA*. 2015;127:312-322. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.008>
4. Andronov E.E., Petrova S.N., Pinaev A.G., Pershina E.V., Rakhimgalieva S.Z., Akhmedenov K.M., Gorobets A.V., Sergaliev N.K. Analysis of the structure of microbial community in soils with different degrees of salinization using T-RFLP and real-time PCR techniques. *Eurasian Soil Science*. 2012;45:147-156. EDN: PDKHVD. <https://doi.org/10.1134/S1064229312020044>
5. Meena M.D., Joshi P.K., Jat H.S., Chinchmalatpure A.R., Narjary B., Sheoran P., Sharma D.K. Changes in biological and chemical properties of saline soil amended with municipal solid waste compost and chemical fertilizers in a mustard-pearl millet cropping system. *CATENA*. 2016;140:1-8. EDN: WOVXSV. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.009>
6. Yan N., Marschner P. Microbial activity and biomass recover rapidly after leaching of saline soils. *Biol Fertil Soils*. 2013;49:367-371. EDN: LTSPBT. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0733-y>
7. Redli M., Pankova E.I. The results of modern research on the salt-affected soils in Europe. *Eurasian Soil Science*. 2004;37(12):1311-1323. (In Russ.). EDN: OWRHRR.
8. Vorob'eva L.A., Pankova E.I. Saline-alkali soils of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2008;41(5):457-470. (In Russ.). EDN: HOAQKN.
9. Lopatovskaya O. G. *Saline soils of the Priolkhonye and Olkhon Islands*. Irkutsk: Irkutsk State University Press; 2018. 205 p. (In Russ.). EDN: YQGURF.
10. Kotenko M.E., Zubkova T.A., Balamirzoev N.A. The electrical resistance of Prusulakskaya lowland's soils of Republic Dagestan. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2009;(6):84-88. (In Russ.). EDN: LACKUL.
11. Shishov L.L., Pankova E.I., eds. *Salt-affected soils of Russia*. Moscow: Academic Book; 2006. 854 p. (In Russ.). EDN: YHNJH.
12. Simonova Yu.V., Rusakova A.V., Korkina E.A. Soil salinization processes in the impact zone of mineralized water discharge by the case study in the Yaroslavl Volga region, Russia. *Bulletin of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2020;65(4):662-680. (In Russ.). EDN: URSSSC. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.404>
13. Brouchkov A. Salt and water transfer in frozen soils induced by gradients of temperature and salt content. *Permafrost Periglac. Process*. 2000;11:53-160. EDN: LGBWNL. [https://doi.org/10.1002/1099-1530\(200004/06\)11:2<153::AID-PPP344>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1099-1530(200004/06)11:2<153::AID-PPP344>3.0.CO;2-Y)
14. Chernousenko G.I. *Salt-affected soils of basins in the South of Eastern Siberia*. Moscow: MAKS Press; 2022. 480 p. (In Russ.). EDN: HENGMY.
15. Elovskaya L.G., Konorovsky A.K., Savvinov D.D. *Permafrost saline soils of Central Yakutia*. Moscow: Science; 1966. 275 p. (In Russ.).
16. Zolnikov V.G., Elovskaya L.G., Tetirina L.V., Chernyak E.I. *Soils of the Vilyu River Basin and their use*. Yakutsk: USSR Academy of Sciences Press; 1962. 204 p. (In Russ.).
17. Konorovsky A.K. *Salt regime of saline soils in the Lena Valley*. Abstract of PhD Thesis. Irkutsk: Zhdanov Irkutsk State University; 1967. 30 p. (In Russ.).
18. Molchanov E.N., ed. *Scientific foundations for preventing degradation of soils (lands) of agricultural lands in Russia and the formation of a system for reproducing their fertility in adaptive landscape agriculture. Vol. 1. Theoretical and methodological foundations for preventing degradation of soils (lands) of agricultural lands*. Moscow: Dokuchaev Soil Institute, Russian Agricultural Academy Press; 2013. 756 p. (In Russ.). EDN: RXZICJ.
19. Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Structural and tectonic criteria of search for kimberlite bodies in Alakit-Markha field. *Ores and Metals*. 2019;(2):55-60. (In Russ.). EDN: YHZBPO. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10014>
20. Grinenko V.S., ed. *State geological map of the Russian Federation*. Scale 1 : 200 000. Verkhnevilyuiskaya series. Sheet Q-49-XXI, XXII (Aikhal). Explanatory note. Moscow: Moscow branch of the Karpinsky All-Russian Research Geological Institute; 2013. 284 p. (In Russ.).
21. Danilov Yu. G., Fedorov A.N., Degteva Zh.F., Gorokhov A.N., Varlamov S.P., Murzin U.A. *Landscapes of Yakutia*. Yakutsk: Northeastern Federal University; 2016. 76 p. (In Russ.).
22. Shadrinova O.V. Analysis of climatic factors in the aspect of development of salinization processes in soils of the Northern taiga landscapes. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2024;(2):90-99. (In Russ.). EDN: TRIEXO. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/2/90-99>
23. Legostaeva Ya.B., Gololobova A.G. Features of distribution of trace elements in soils of background and impact zones in diamond mining areas in the Northwest of the Siberian platform. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(9):142-153. (In Russ.). EDN: PLXWDE. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3364>

24. Bezuglova O.S., Valkov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Morozov I.V. Study of high concentrations of metals in the humus state and biological activity of ordinary chernozem. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 1999;(2):65-71. (In Russ.). EDN: ZHIPUT.

25. Pankratova K.G., Shchelokov V.I., Sazonov Yu.G. Determination of humus content in case of soil contamination with petroleum products. *Fertility*. 2007;(4):20-21. (In Russ.). EDN: KUCKKH.

26. Prokhorova N.V. The ecological and geochemical role of motor transport in an urban environment. *Bulletin of Samara University. Natural Science Series*. 2005;(5):188-199. (In Russ.). EDN: GXOMCN.

27. Yannikov A.M., Yannikova S.A., Zyrianov I.V. Korepanov A.Yu. Prospects of using deep-lying aquifers for injection of low-mineralized waters. *Russian Mining Industrial J*. 2022;(1):76-81. (In Russ.). EDN: NFNTHB. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-76-81>

28. *On the methodology for determining the extent of damage caused by soil and land degradation*: Letter from the Russian Ministry of Agriculture dated July 29, 1994, No. 3-14-2/1139. Available from: <https://rulaws.ru> [Accessed 17th January 2025].

Информация об авторах

О.В. Шадринова – младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии и биогеохимии ИГМ СО РАН.

Я.Б. Легостаева – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии и биогеохимии ИГМ СО РАН.

Information about the authors

O.V. Shadrinova – Junior Researcher, Laboratory of Geoecology and Biogeochemistry, DPMGI SB RAS.

Ya.B. Legostaeva – Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Geoecology and Biogeochemistry, DPMGI SB RAS.

*Статья поступила в редакцию 20.02.2025; одобрена после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 20.02.2025; approved after reviewing 21.04.2025; accepted for publication 10.07.2025.*

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 631.46; 57.044

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-135-142>

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ SSR-МАРКЕРОВ ДЛЯ ГЕНОТИПИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ЛЕКАРСТВЕННОЙ ФЛОРЫ

Зура Исановна Бисултанова¹, Петимат Махмудовна Джамбетова²

^{1, 2} Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Грозный, Чеченская Республика, Россия

² Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный, Чеченская Республика, Россия

¹ Zura_sun@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3925-8004>

² Petimat-lg@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6431-4549>

Аннотация. Генетические маркеры SSR служат бесценными инструментами для выяснения популяционных генетических структур. На их основе предпринимаются попытки построить базу данных фингерпринтинга SSR, чтобы обеспечить поддержку для аналогичного скрининга растений на видовую или сортовую принадлежность. В этом исследовании, используя разные виды лекарственной флоры (*M. piperita*, *M. longifolia*, *P. major*, *S. glutinosa*, *A. ursinum*, *T. officinale*), сделана попытка выбрать набор маркеров SSR для генотипирования с высоким уровнем специфичности и полиморфизма, подходящий для электрофореза в агарозном геле. Выявлено, что межвидовая генетическая дистанция значительно превосходит внутривидовую у 6 видов растений. Из выбранных 6 пар праймеров 4 дали 99,91 % полиморфных полос при тестировании на 6 видах растений, что свидетельствует о расхождении видов за счет генетического разнообразия. Маркеры SSR характеризуются высоким полиморфизмом, информативностью, повторяемостью, нейтральностью и могут быть использованы для однозначной идентификации видов.

Ключевые слова: лекарственная флора, SSR-маркеры, генетическое разнообразие, праймеры, молекулярные маркеры, видоидентификация

Для цитирования: Бисултанова З.И., Джамбетова П.М. Анализ эффективности SSR-маркеров для генотипирования некоторых видов лекарственной флоры // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 135–142. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-135-142>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SSR MARKERS FOR GENOTYPING OF SOME TYPES OF MEDICINAL FLORA

Zura I. Bisultanova¹, Petimat M. Dzhambetova²

^{1, 2} A.A. Kadyrov Chechen State University, Grozny, Chechen Republic, Russia

² Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Chechen Republic, Russia

¹ Zura_sun@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3925-8004>

² Petimat-lg@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6431-4549>

© Бисултанова З.И., Джамбетова П.М., 2025

Abstract. SSR genetic markers serve as invaluable tools for elucidating population genetic structures. Attempts are being made to build an SSR fingerprinting database on their basis to provide support for similar screening of plants for species or varieties. In this study, using different species of medicinal flora (*M. piperita*, *M. longifolia*, *P. major*, *S. glutinosa*, *A. ursnium*, *T. officinale*), we tried to select a set of SSR markers for genotyping with high specificity and polymorphism, suitable for agarose gel electrophoresis. It was found that the interspecific genetic distance was very high compared to the intraspecific genetic distance in 6 plant species. Of the selected 6 primer pairs, 4 gave 99.91% polymorphic bands when tested on 6 plant species, indicating that the species diverged from each other due to high genetic diversity. SSR markers generated a high percentage of polymorphism in genotypes and determined the highly informative nature of the markers. High interspecific genetic diversity and low intraspecific diversity indicate that SSR markers can be used for unambiguous identification of species.

Keywords: medicinal flora, SSR markers, genetic diversity, primers, molecular markers, species identification

For citation: Bisultanova Z.I., Dzhambetova P.M. Analysis of the Efficiency of SSR Markers for Genotyping of Some Types of Medicinal Flora. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):135-142. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-135-142>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Понимание генетического разнообразия и правильная идентификация являются важнейшим шагом для сохранения видов. Потенциал адаптации и выживаемости вида зависит от оценки генетического разнообразия. В случае важных с медицинской точки зрения видов, находящихся под угрозой исчезновения, знание генетического разнообразия и изменчивости необходимо для разработки эффективных стратегий управления и сохранения [1]. Явление фальсификации на рынке трав становится все более распространенным (много заменителей или примесей). Чтобы эффективно контролировать защиту рынка трав для обеспечения их безопасности, ученые используют технологию ДНК-штрихкодирования, чтобы отличать подлинные продукты от их подделок [2]. Молекулярные маркеры выступают в качестве достоверно надежных инструментов для идентификации генетической дифференциации у растений на генетическом уровне [3, 4]. Возможность различать виды может привести к улучшению лекарственного потенциала, контролю качества и стабильности коммерческих продуктов, содержащих материал из этих растений.

В 1989 г. был впервые введен термин «микросателлит» для обозначения гипервариабельного повторяющегося участка гена актина сердечной мышцы человека [5]. С тех пор микросателлиты стали называться по-разному: простые последовательные (SSR) и короткие тандемные повторы (STR). Они также упоминаются в исследованиях, касающихся тандемных повторов с переменным числом (VNTR), простых последовательных тандемных повторов (SSTR), участков между микросателлитными повторами (ISSR), простых полиморфизмов длины последовательности (SSLP) и микросателлитов с целевой последовательностью (STMS) [6].

Характеризуясь высоким полиморфизмом, повторяемостью, кодоминантной экспрессией и нейтральностью, SSR служат бесценными инструментами для выяснения популяционных генетических структур, потока генов, генетических отношений и жизнеспособности популяции. Они играют важную роль в оценке последствий фрагментации среды обитания и в разработке стратегий сохранения [7]. Широкое признание маркеры SSR получили как простые, универсальные и понятные молекулярные инструменты для генотипирования растений [3, 8]. Одним из ярких примеров применения маркеров SSR для генотипирования растений является маркирование сортов неочанной китайской капусты [1].

На основе маркеров SSR предпринимаются попытки построить базу данных фингерпринтинга SSR, чтобы обеспечить поддержку для аналогичного скрининга растений на видовую или сортовую принадлежность [9].

В данном исследовании, используя разные виды лекарственных растений, сделана попытка выбрать маркеры SSR для генотипирования с высоким уровнем специфичности и полиморфизма, подходящие для электрофореза в агарозном геле. Цель исследования – протестировать наборы праймеров SSR, характерных для одуванчика осеннего (*Taraxacum hybernum* Steven), методом ПЦР для генотипирования других видов природной флоры.

Материалы и методы

Отбор проб растений. В этом исследовании отобраны растения 6 видов диких популяций (мяты перечной (*Méntha piperíta*), мяты длиннолистной (*M. longofolia*), подорожника большого (*Plantágo májor*), шалфея клейкого (*Salvia glutinosa*), одуванчика лекарственного (*Taraxacum officionale*) и медвежьего лука (*Allium ursnium*)) в нескольких районах Чеченской Республики и Ставропольского края (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Виды лекарственной флоры и координаты места сбора растений
/ **Types of medicinal flora and coordinates of the place of plant collection**

Вид	Место сбора	Координаты, высота над уровнем моря, м
Мята перечная (<i>M. piperíta</i>)	Шатойский район, с. Нихалой	42.5012336, 45.3945036610
	Итум-Калинский район, с. Тазбичи	42.4224120, 45.35431521030
	Веденский район, с. Ведено	42.5837056, 46.4370925670
Мята длиннолистная (<i>M. longofolia</i>)	Итум-Калинский район, с. Тазбичи	42.4224120, 45.35431521030
Подорожник большой (<i>P. májor</i>)	Шатойский район, с. Нихалой	42.5012336, 45.3945036609
Шалфей клейкий (<i>S. glutinosa</i>)	Веденский район, с. Ведено	42.5837056, 46.437092670
Одуванчик лекарственный (<i>T. officionale</i>)	Веденский район, с. Ведено	42.5837056, 46.437092670
Медвежий лук (<i>A. ursnium</i>)	Ставропольский край, ст. Новокатериновская	44.788992, 42.051301580
	Сунженский район, с. Бамут	43.823856, 45.1022728460

В каждой популяции случайным образом отбирали не менее 3 особей (каждая находилась на расстоянии ≥ 50 м друг от друга), всего – 21 особь из разных популяций. В процессе сбора данных регистрировались широта и долгота каждой выборочной популяции. Информация о местонахождении выборочной популяции и особей выборки каждой популяции представлена на рис. 1.

Для тестирования были заказаны несколько пар праймеров [10], продемонстрировавших эффективность для SSR-анализа нескольких видов рода *Taraxacum* (табл. 2) [10, 11]. В исследовании рассматривались микросателлитные маркеры со стандартным размером 2–6 олигонуклеотидов, исключая одиночные нуклеотиды.

Геномную ДНК экстрагировали из свежих тканей собранных растений (в основном листьев) с использованием растительного набора D-plants-50 (Biolabmix, Новосибирск) в соответствии с рекомендациями производителя. В основе действия реагентов, входящих в состав набора, лежит избирательное сорбирование нуклеиновых кислот на мембране из диоксида кремния.

Для генотипирования одуванчика лекарственного использовали образцы ДНК, выделенные из растений ранее с применением набора DNeasy Plant Pro Kit (Qiagen, Германия). Всего выбрано 12 пар праймеров (табл. 2). Их использовали для ПЦР-амплификации всех образцов ДНК в реакционной системе объемом 50 мкл (1 мкл матричной ДНК, 1 мкл смеси праймеров в соотношении 1:1, 25 мкл реакционной смеси «Биомастер HS-Tag ПЦР-Color» (Biolabmix, Новосибирск)). Стерильной водой H_2O доводили до соответствующего объема (50 мкл). Реакцию ПЦР проводили в термоциклере 2720 (Applied Biosystems, США).



Рис. 1. Карта точек сбора растений природной флоры в Чеченской Республике и Ставропольском крае / Fig. 1. Map of collection points of natural flora plants in the Chechen Republic and Stavropol Region

Таблица 2 / Table 2

Характеристика SSR-праймеров / Characteristics of SSR primers

Локус	Мотив SSR	Последовательность праймеров
TKS_003	AG	F-5'-TCACCGAGTTGTAGAGAGAGA-3'
		R-3'-CAGCAATTAAGGCTCTGAAA-5'
TKS_0091	TA	F-5'-GCAAGTTTGCACCAGTTT-5'
		R-3'-GTTATTTGTTAACCCATTCCA-5'
TKS_0110	GGA	F-5'-GGCTGATCAAGAGTACTGTCC-5'
		R-3'-TTATATGGGAATATACCGGAAG-5'
TKS_111	TCG	F-5'-ATCTACAACAAGTTCGTGAGG-3'
		R-3'-AATCAACTGGATTTCTTAGGG-5'
TKS_112	ATC	F-5'-ACAGGAGTTGATGTCTTGATG-3'
		R-3'-ATTGAATCATTAACCGTCAGA-5'
TKS_113	AAC	F-5'-CCAAGACCTCTACAATCGTTA-3'
		R-3'-ATCTTCGGAGTAGTGGATTGA-5'

Протокол ПЦР: первичная денатурация при 94 °С – 3 мин; затем 35 циклов, включающих денатурацию при 94 °С, – 40 с, отжиг при температуре 55 °С – 40 с, элонгацию при 72 °С – 40 с; завершающая элонгация – 5 мин при 72 °С. Продукты ПЦР хранились в амплификаторе при температуре 4 °С. Анализ результатов амплификации проводили с помощью горизонтального электрофореза в 1,8%-м агарозном геле с добавлением бромида этидия, визуализировали ампликоны в проходящем через трансиллюминатор (Vilber Lourmat, Франция) УФ-свете.

Уровень полиморфизма определяли с помощью программы Popgene 1.32.

Результаты

Идентифицированы отличительные полосы для анализируемых видов с помощью анализа отпечатков полос на полученных электрофореграммах (рис. 2–4). Использование маркеров 011, 091 и 110 для генотипирования образцов ДНК, выделенных из мяты длиннолистой и подорожника большого, показало, что праймеры 011 и 110 при заданных условиях термоциклирования не работают, тогда как праймер 091 дает четко различимые полосы.



Рис. 2. Результаты генотипирования геномной ДНК мяты перечной и подорожника большого методом ПЦР: М – маркер; 1–3; – *M. longifolia*, окр. с. Нихалой; 1, 2 – праймер 011; 3 – праймер 091; 4–6 – *M. longifolia*, окр. с. Тазбичи; 4, 5 – праймер 011; 6 – праймер 091; 7, 8 – *P. májor*, окр. с. Тазбичи; 7, 8 – праймер 091. Дата сбора 31.08.2024 / Fig. 2. Results of PCR genotyping of genomic DNA of peppermint and plantain: M - marker; 1-3 - *M. longifolia*, near the village of Nihaloy; 1, 2 - primer 011; 3 - primer 091; 4, 6 - *M. longifolia*, near the village of Tazbichi; 4, 5 - primer 011; 6 - primer 091; 7, 8 - *P. májor*, near the village of Tazbichi; 7-8 - primer 091. Collection date: 31.08.2024

При этом обращает на себя внимание тот факт, что для мяты длиннолистой и мяты перечной, собранных из разных популяций, получен совершенно разный отпечаток из 4 полос.

В то же время для подорожника большого (оба образца из одной популяции), несмотря на то что четко различимые полосы разнятся у обоих растений (размеры 600 и 300 п.н. соответственно), с учетом слабовыраженных полос можно предположить, что праймеры 091 выявляют в *P. májor* одинаковые фрагменты.

Результаты генотипирования SSR-маркеров с использованием пары праймеров 003 (табл. 2) показывают, что фингерпринтинг разных видов растений отличается друг от друга, вместе с тем внутри вида аллельная изменчивость показала некоторые общие тенденции в отношении расположения SSR (рис. 3). Но для уточнения числа и частоты аллелей необходимо исследовать большее количество образцов каждого вида.

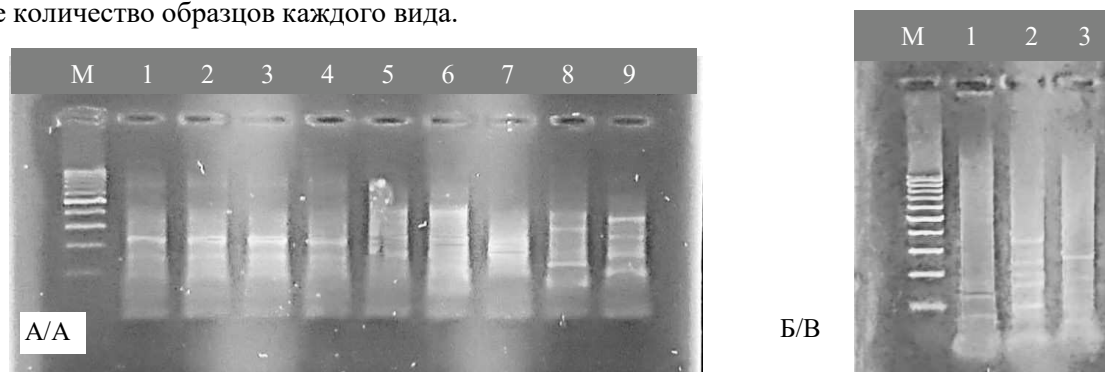


Рис. 3. Электрофорез с прямым и обратным праймером 003. А: 1–4 – *A. Ursinum*; 1, 2 – окр. с. Бамут, 3, 4 – окр. ст. Новоекатериновской; 5, 6 – *T. officinale*, окр. с. Ведено; 7 – *M. piperita*, окр. с. Нихалой; 8 – *P. májor*, окр. с. Нихалой; 9 – *S. glutinosa*, окр. с. Нихалой. Б: М – маркер; 1 – *P. major*; 2 – *S. glutinosa*; 3 – *M. piperita* / Fig. 3. Electrophoresis with forward and reverse primer 003. А: 1-4 - *A. ursinum*; 1, 2 - near Bamut village; 3, 4 - near Novoeкатериновskaya station; 5, 6 - *T. officinale*, near Vedenovillage, 7 - *M. piperita*, near Nihaloy village, 8 - *P. major*, near Nihaloy village, 9 - *S. glutinosa* near Nihaloy village. Б: M - marker; 1 - *P. major*; 2 - *S. glutinosa*; 3 - *M. piperita*

Для одуванчика лекарственного количество амплифицированных фрагментов с одинаковым расположением в обоих образцах – 3. Разные генотипы были сгенерированы маркером SSR 003 в образце мяты перечной, подорожника большого и шалфея клейкого. Количество амплифицированных полос у мяты перечной составило в среднем 7,3.

Первоначально была попытка идентифицировать отличительные полосы для медвежьего лука с помощью процесса отбора полос. Однако никаких диагностических полос между разными популяциями обнаружено не было. Наблюдаемое число аллелей равнялось 5 в случае с праймером 110 и 7 – с праймером 113. Размеры полос для каждого образца совпадали вне зависимости от популяционной принадлежности.

Во всех 4 образцах медвежьего лука из разных мест обитания амплифицированы две полиморфные полосы размером 170 и 235 п.н., соответствующие, по-видимому, одним и тем же простым мотивам повторения последовательности (рис. 4).

Обсуждение

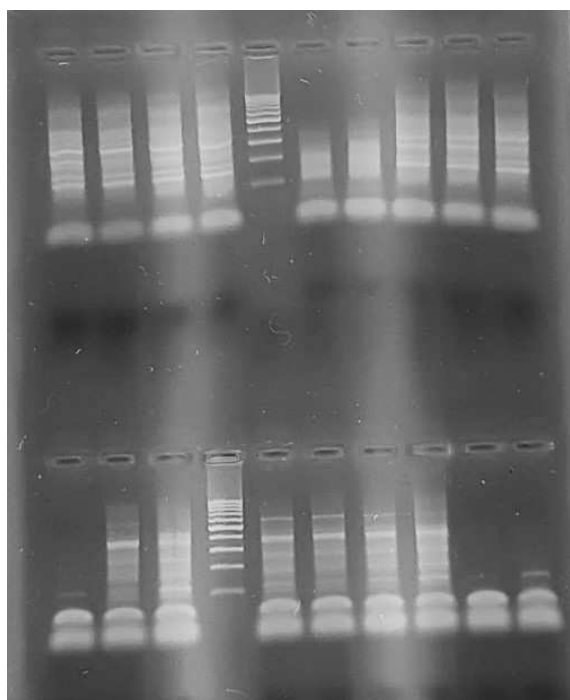


Рис. 4. Электрофорез результатов ПЦР с прямым и обратным праймером 110 – I ряд, 113 – II. ДНК *Allium ursinum* из разных популяций / Fig. 4.

Electrophoresis of PCR results with forward and reverse primers 110 in the first row and 113 in the second row of *Allium ursinum* DNA from different populations

Используя разные виды лекарственной флоры Чеченской Республики, мы попытались проверить специфичность наборов маркеров SSR, протестированных на одуванчике лекарственном [12], для выбора маркерных технологий в сравнительных генетических исследованиях. На основе основных маркеров SSR можно построить базу данных отпечатков полос SSR для скрининга видов [13–15]. Для всех пар, использованных в настоящем исследовании SSR-праймеров, наблюдалось низкое внутривидовое разнообразие. Межвидовая генетическая дистанция значительно превышала внутривидовую у 6 видов растений. Из выбранных 6 пар праймеров 4 дали 99,91 % полиморфных полос при тестировании на 6 видах растений. Это свидетельствовало о том, что виды хорошо расходятся, обладая большим генетическим разнообразием. Маркеры SSR генерируют высокий процент полиморфизма в генотипах, характеризуются широкой информативностью, повторяемостью и могут быть использованы для однозначной идентификации видов. Однако данное исследование имеет ограничительный характер в связи с небольшим количеством исследованных образцов каждого вида, но может быть полезным для инициирования разработок молекулярных маркеров ценных видов растений.

Список источников

1. Patil S.M., Chandanshive V.V., Tamboli Ash., Adsul A.A., Yadav S.R., Govindwar S.P. Analysis of genetic variability in endemic medicinal plants of genus Chlorophytum from the Indian subcontinent using amplified fragment length polymorphism marker // Comptes Rendus. Biologies, 2015. Vol. 338, № 12. P. 838–845. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2015.09.006>
2. Yu J., Wu X., Liu C., Newmaster S., Ragupathy S., John Kress W. Progress in the use of DNA barcodes in the identification and classification of medicinal plants // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021. Vol. 208. Art. 111691. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111691>
3. Нугматуллина Н.В., Кулуев А.Р., Кулуев Б.Р. Молекулярные маркеры, применяемые для определения генетического разнообразия и видоидентификации дикорастущих растений // Биомика. 2018. Т. 10, № 3. С. 290–318. <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2018-39>

4. Naik A., Mishra S.K., Nag A., Soren G.K., Panda A.K., Panda S.K., Panigrahi J. Cross-genera amplification of Cajanus spp. specific SSR markers in *Clitoria ternatea* (L.) and their application in genetic diversity studies // *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 2020. Vol. 26, № 12. P. 2371–2390. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00907-x>
5. Litt M., Luty J.A. A hypervariable microsatellite revealed by *in vitro* amplification of a dinucleotide repeat within the cardiac muscle actin gene // *Am. J. Hum. Genet.* 1989. Vol. 44, № 3. P. 397–401. PMID: PMC1715430. PMID: 2563634.
6. Alves S.I.A., Dantas C.W.D., Macedo D.B., Ramos R.T.J. What are microsatellites and how to choose the best tool: a user-friendly review of SSR and 74 SSR mining tools // *Front Genet.* 2024. Vol. 15. Art. 1474611. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1474611>
7. Hu L., Wang J., Wang X., Zhang D., Sun Y., Lu T., Shi W. Development of SSR markers and evaluation of genetic diversity of endangered plant *Saussurea involucrata* // *Biomolecules*. 2024. Vol. 14, № 8. Art. 1010. <https://doi.org/10.3390/biom14081010>
8. Федулова Т.П., Кондратьева А.М., Ржевский С.Г. Микросателлитный анализ генетического разнообразия насаждений берёзы // *Экол. мониторинг и биоразнообразие*. 2016. № 1 (11). С. 129–131. EDN: WKFWTV.
9. Супрун И.И. Мультиплексный анализ микросателлитных маркеров в ДНК-паспортизации сортов черешни // *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2024. № 90 (6). С. 1–9. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2024-6-90-1-9>
10. Кулуев Б.Р., Фатерыга А.В., Кулуев А.Р., Михайлова Е.В., Чемерис А.В. Молекулярно-генетическое исследование одуванчика осеннего (*Taraxacum hybernum* Steven) с использованием SSR-, RAPD- и ISSR-маркеров // *Вавиловский журн. генетики и селекции*. 2018. Т. 22, № 1. С. 102–107. <https://doi.org/10.18699/VJ18.337>
11. McAssey E.V., Gudger E.G., Zuellig M.P., Burke J.M. Population Genetics of the Rubber-Producing Russian Dandelion (*Taraxacum kok-saghyz*) // *PLoS One*. 2016. Vol. 11, № 1. Art. e0146417. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146417>
12. Бисултанова З.И., Ацаева М.М., Джамбетова П.М. Использование геномных SSR-маркеров RAPD- и ISSR-анализа для оценки генетического разнообразия одуванчика лекарственного // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Естеств. и техн. науки*. 2022. № 1. С. 12–16. EDN: FWGVJW. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2022.01.08>
13. Yan X.L., Guan Z.R., Wen W., Zhang Z.F., Wang C.Y., Shen J.J. et al. Establishment and application of mustard variety identification system based on SSR markers (*Brassica juncea* L.) // *J. Plant Genet. Resour.* 2021. Vol. 22. P. 758–770. <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20201014002>
14. Yin J., Zhao H., Wu X., Ma Y., Zhang J., Li Y., Shao G., Chen H., Han R., Xu Z. SSR marker-based analysis for identification and of genetic diversity of non-heading Chinese cabbage varieties // *Front. Plant Sci.* 2023. Vol. 14. Art. 1112748. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1112748>
15. Zhou Y., Cao H.H., Wang Y., Huang X.C., Gu S.G., Fu L.J. Application prospect of molecular markers in DUS testing // *Anhui Agric. Sci. Bull.* 2020. Vol. 26. P. 15–18. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7731.2020.17.006>

References

1. Patil S.M., Chandanshive V.V., Tamboli Ash., Adsul A.A., Yadav S.R., Govindwar S.P. Analysis of genetic variability in endemic medicinal plants of genus Chlorophytum from the Indian subcontinent using amplified fragment length polymorphism marker. *Comptes Rendus. Biologies*. 2015;338(12):838-845. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2015.09.006>
2. Yu J., Wu X., Liu C., Newmaster S., Ragupathy S., John Kress W. Progress in the use of DNA barcodes in the identification and classification of medicinal plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;208:111691. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111691>
3. Nigmatullina N.V., Kuluev A.R., Kuluev B.R. Molecular markers used to determine genetic diversity and species identification of wild plants. *Biomics*. 2018;10(3):290-318. (In Russ.). <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2018-39>
4. Naik A., Mishra S.K., Nag A., Soren G.K., Panda A.K., Panda S.K., Panigrahi J. Cross-genera amplification of Cajanus spp. specific SSR markers in *Clitoria ternatea* (L.) and their application in genetic diversity studies. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 2020;26(12):2371-2390. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00907-x>
5. Litt M., Luty J.A. A hypervariable microsatellite revealed by *in vitro* amplification of a dinucleotide repeat within the cardiac muscle actin gene. *Am. J. Hum. Genet.* 1989;44(3):397-401. PMID: 2563634. PMID: PMC1715430.
6. Alves S.I.A., Dantas C.W.D., Macedo D.B., Ramos R.T.J. What are microsatellites and how to choose the best tool: a user-friendly review of SSR and 74 SSR mining tools. *Front Genet.* 2024;15:1474611. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1474611>

7. Hu L., Wang J., Wang X., Zhang D., Sun Y., Lu T., Shi W. Development of SSR Markers and Evaluation of Genetic Diversity of Endangered Plant *Saussurea involucrata*. *Biomolecules*. 2024;14(8):1010. <https://doi.org/10.3390/biom14081010>
8. Fedulova T.P., Kondratieva A.M., Rzhevsky S.G. Microsatellite analysis of genetic diversity of birch plantations. *Environmental Monitoring and Biodiversity*. 2016;(1):129-131. (In Russ.). EDN: WKFWTV.
9. Suprun I.I. Multiplex analysis of microsatellite markers in DNA certification of sweet cherry varieties. *Fruit Growing and Viticulture in the South of Russia*. 2024;(90):1-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2024-6-90-1-9>
10. Kuluev B.R., Fateryga A.V., Kuluev A.R., Mikhailova E.V., Chemeris A.V. Molecular genetic study of autumn dandelion (*Taraxacum hybernum* Steven) using SSR, RAPD and ISSR markers. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(1):102-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.18699/VJ18.337>
11. McAssey E.V., Gudger E.G., Zuellig M.P., Burke J.M. Population Genetics of the Rubber-Producing Russian Dandelion (*Taraxacum kok-saghyz*). *PLoS One*. 2016;11(1):e0146417. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146417>
12. Bisultanova Z.I., Atsaeva M.M., Dzhambetova P.M. Using genomic SSR markers RAPD and ISSR analysis to assess the genetic diversity of dandelion. *Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2022;(1):12-16. (In Russ.). EDN: FWGVJW. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2022.01.08>
13. Yan X.L., Guan Z.R., Wen W., Zhang Z.F., Wang C.Y., Shen J. J. et al. Establishment and application of mustard variety identification system based on SSR markers (*Brassica juncea* L.). *J. Plant Genet. Resour.* 2021;22:758-770. <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20201014002>
14. Yin J., Zhao H., Wu X., Ma Y., Zhang J., Li Y., Shao G., Chen H., Han R., Xu Z. SSR marker-based analysis for identification and of genetic diversity of non-heading Chinese cabbage varieties. *Front. Plant Sci.* 2023;14:1112748. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1112748>
15. Zhou Y., Cao H.H., Wang Y., Huang X.C., Gu S.G., Fu L.J. Application prospect of molecular markers in DUS testing. *Anhui Agric. Sci. Bull.* 2020;26:15-18. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7731.2020.17.006>

Информация об авторах

З.И. Бисултанова – старший преподаватель кафедры клеточной биологии, морфологии и микробиологии ЧГУ.

П.М. Джамбетова – доктор биологических наук, профессор кафедры клеточной биологии, морфологии и микробиологии ЧГУ; главный научный сотрудник, заведующая лабораторией экологического мониторинга живых систем КНИИ РАН.

Information about the authors

Z.I. Bisultanova – Senior Lecturer, Department of Cell Biology, Morphology and Microbiology, ChSU.

P.M. Dzhambetova – Doctor of Science (Biology), Professor of the Department of Cell Biology, Morphology and Microbiology, ChSU; Chief Researcher, Head of the Laboratory of Ecological and Genetic Monitoring of Living Systems, CI RAS.

*Статья поступила в редакцию 06.01.2025; одобрена после рецензирования 05.02.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 06.01.2025; approved after reviewing 05.02.2025; accepted for publication 10.07.2025.*

Научная статья

УДК 663.125/663.252.4

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-143-149>

НЕКОТОРЫЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВИННЫХ ШТАММОВ ДРОЖЖЕЙ *S. CEREVISIAE* В УСЛОВИЯХ СТРЕССА

Эльвира Ахмедовна Исламгагомедова^{1✉}, Эсланда Абдурахмановна Халилова²,
Аида Алевдиновна Абакарова³

^{1, 2, 3} Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ islamtagomedova@mail.ru✉

² eslanda61@mail.ru

³ aida.abakarva@rambler.ru

Аннотация. Исследовано влияние экстремальных условий на морфологические и некоторые биохимические свойства штаммов дрожжей *S. cerevisiae* M-12x (Y-395), Y-3980, Y-4270, предназначенных для использования в виноделии и обладающих способностью адаптироваться к определенным факторам стресса. Изучено содержание минеральных веществ в биомассе штаммов. Обнаружен идентичный качественный состав; в количественном отношении во всех вариантах преобладали ионы калия. Вероятно, оптимальная концентрация макро- и микроэлементов оказала влияние на устойчивость штаммов к экстремальным факторам, что способствовало регуляции определенных физиологических процессов в дрожжевой клетке, в дальнейшем – формированию технологических и органолептических свойств вина. Сравнительное исследование морфологических свойств дрожжей *S. cerevisiae* M-12x (Y-395), Y-3980, Y-4270 демонстрирует толерантность данных штаммов к температуре 37 °С, этанолу 12 % и глюкозе 20 % в составе среды культивирования, что подтверждает их стрессоустойчивость и перспективность использования в виноделии.

Ключевые слова: штаммы *S. cerevisiae*, температура, глюкоза, этанол, минеральные вещества, морфология, клетки, гигантские колонии

Для цитирования: Исламгагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А. Некоторые морфологические и биохимические особенности винных штаммов дрожжей *S. cerevisiae* в условиях стресса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 143–149. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-143-149>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

SOME MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL FEATURES OF WINE STRAINS YEAST *S. CEREVISIAE* UNDER STRESS

Elvira A. Islamtagomedova^{1✉}, Eslanda A. Khalilova², Aida A. Abakarova³

^{1, 2, 3} Caspian Institute of Biological Resources of the Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

¹ islamtagomedova@mail.ru✉

² eslanda61@mail.ru

³ aida.abakarva@rambler.ru

Abstract. The influence of extreme conditions on the morphological and some biochemical properties of yeast strains *S. cerevisiae* M-12x (Y-395), Y-3980, Y-4270, intended for use in winemaking and having the ability to

© Исламгагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А., 2025

adapt to certain stress factors, was studied. As a result of studying the content of mineral substances in the biomass of the strains, an identical qualitative composition was discovered; in quantitative terms, potassium ions predominated in all variants. Probably, the optimal concentration of macro- and microelements influenced the resistance of the studied strains to extreme factors, which contributed to the regulation of certain physiological processes in the yeast cell and subsequently to the formation of the technological and organoleptic properties of wine. A comparative study of the morphological properties of the yeasts *S. cerevisiae* M-12x (Y-395), Y-3980, Y-4270 demonstrates the tolerance of these strains to a temperature of 37 °C, ethanol 12 % and glucose 20 % in the cultivation medium, which confirms their resistance to stress and prospects for use in winemaking.

Keywords: *S. cerevisiae* strains, temperature, glucose, ethanol, minerals, morphology, cells, giant colonies

For citation: Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Abakarova A.A. Some Morphological and Biochemical Features of Wine Strains Yeast *S. cerevisiae* under Stress. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):143-149. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-143-149>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Отличительная особенность вин заключается в уникальных ароматических и вкусовых характеристиках, которые формируются за счёт различных факторов, в том числе использования штаммов дрожжей, обладающих определенными морфологическими и физиолого-биохимическими параметрами, а также устойчивостью к стрессу [1]. В лаборатории биохимии и биотехнологии ПИБР ДФИЦ РАН получены предназначенные для использования в виноделии новые штаммы дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, характеризующиеся способностью к адаптации в экстремальных условиях. Штамм M-12x (Y-395), для которого элективными питательными средами являются виноградное и солодовое сусло при pH 2,8–3,2, выделен в результате действия сверхнизких температур [2]. Штамм Y-3980, предназначенный для вторичного сброживания тиражной смеси под давлением в процессе производства игристых вин, получен из шампанизируемого вина [3]. Из осадков сброженного сусла и мезги винограда сорта Каберне методом селекции выделен штамм дрожжей *S. cerevisiae* Y-4270 для производства красных столовых вин [4]. Изменение условий культивирования в технологических процессах оказывает существенное воздействие на метаболизм дрожжей, при этом известна тесная связь между содержанием микроэлементов и жизнеспособностью клеток в условиях повышенного давления, кислотности, этанола, холодного и термического шока [5, 6]. Происходящие в условиях стресса преобразования влияют на морфологические свойства дрожжей. Представляет интерес исследование некоторых биохимических и морфологических свойств, рекомендуемых для использования в виноделии штаммов.

Цель работы – изучение содержания минеральных веществ в биомассе винных штаммов, а также сравнение морфологических свойств клеток, гигантских колоний дрожжей *S. cerevisiae* M-12x (Y-395), Y-3980, Y-4270 и стандартного лабораторного S288c (Y-3315) при экстремальных значениях температуры (37 °C), этанола (12 %) и осмотическом давлении (20 % глюкозы).

Методика эксперимента

Объекты исследований – коллекционные штаммы *S. cerevisiae* M-12x (Y-395) [2], Y-3980 [3], Y-4270 [4], S288c (Y-3315) [7]. Их культивирование осуществляли на чашках Петри в течение 10 сут при температуре 37 °C в микробиологическом инкубаторе BINDER BF 115 (Германия). В состав контрольной среды YPD входили: D-глюкоза (Merk, Германия) – 2,0 %; дрожжевой экстракт (BD, США) – 0,5; пептон (BD, США) – 0,5; агар-агар – 2,5 % (Difco, Нидерланды). Опытный вариант среды готовили на основе YPD: дрожжевой экстракт – 0,5, пептон – 0,5 %, D-глюкоза – 20,0, этанол – 12, агар-агар – 2,5 %. Кислотность среды pH 4,5 корректировали 1N HCl (Россия) с помощью pH-метра Hanna Instruments pH 211 (Германия).

Морфологический анализ клеток колоний (форма, величина) изучали с использованием светового микроскопа CX21 (Olympus, Япония) и цифровой фотокамеры Canon Power Shot A640 (Япония) при рабочем увеличении ×1000. Основным критерием для определения морфологиче-

ского типа колоний служила совокупность стандартных признаков (форма, размер, цвет, поверхность, профиль, структура).

Для получения биомассы, предназначенной для исследования макро- и микроэлементов, использовали дрожжевую 3-суточную суспензию, которая высевалась на контрольную питательную среду YPD-агар в чашки Петри (ламинарный бокс ВЛ-12 1000 (Россия)). Культивирование осуществляли в течение 2 недель. Изучение влажности биомассы проводили стандартным методом в сушильном шкафу SNOL 67/350 (Utenos, Литва) в течение 2 ч при температуре 105 °С (до постоянного веса). Содержание минеральных веществ в исследуемых вариантах дрожжей определяли после сухого озоления в муфельной печи ERSTEVAK EVHEAT-ПМ-18-1400-М2 (Россия) при температуре 450–500 °С и последующей обработки проб концентрированной азотной кислотой. Исследование минеральных элементов проводили методом атомно-абсорбционной спектрометрии [8] на приборе Savant AAS (USA).

Результаты и обсуждение

Изучено содержание минеральных веществ в биомассе штаммов *S. cerevisiae* М-12х, Y-3980 и Y-4270 [9, 10]. В результате сравнительного исследования качественного состава выявлена их идентичность (табл. 1). Анализ суммарного содержания показал пониженное накопление минеральных веществ в биомассе штамма *S. cerevisiae* 3980, предназначенного для производства шампанских вин. Во всех вариантах в количественном отношении преобладали ионы калия, которые оказывают влияние на биосинтез белков, фосфорный и липидный обмен дрожжей, действуют как активатор ферментов спиртового брожения; в составе солей органических кислот обеспечивают бактерицидные свойства вин, предохраняя их от заболеваний.

Таблица 1 / Table 1

Содержание макро- и микроэлементов в биомассе штаммов дрожжей *S. cerevisiae* М-12х, Y-3980, Y-4270 (адаптировано из [9, 10]) / Content of macro- and microelements in the biomass of yeast strains *S. cerevisiae* М-12х, Y-3980, Y-4270 (adapted from [9, 10])

Элемент, мг/кг	Штамм		
	М-12х	Y-3980	Y-4270
Натрий	480,00±41,03	251,14±14,08	298,00±16,22
Калий	8600,00±110,93	6929,71±97,86	9200,00±114,02
Кальций	68,00±5,44	20,40±2,08	23,00±2,11
Магний	183,00±17,08	258,57±20,88	105,00±8,08
Литий	0,29±0,03	0,34±0,03	0,41±0,04
Железо	4,06±0,33	2,06±0,15	9,01±0,88
Кадмий	0,12±0,01	0,14±0,01	0,12±0,01
Цинк	0,82±0,07	4,46±0,42	5,98±0,66
Медь	0,20±0,01	5,71±0,50	4,88±0,41
Свинец	0,36±0,04	0,48±0,05	0,41±0,05
Никель	0,80±0,07	2,03±0,18	0,89±0,08
Марганец	1,80±0,15	1,99±0,18	2,08±0,23
В сумме	9339,45±175,19	7477,03±136,42	9649,78±142,38

В биомассе штамма Y-3980 их концентрация в 1,24 и 1,33 раза меньше аналогичных показателей М-12х и Y-4270. В биомассе штамма М-12х повышено содержание ионов натрия и кальция, оказывающих влияние на технологический процесс и качество вина. Ионы магния, играющие роль активатора в дрожжевой клетке и принимающие участие в осаждении коллоидов при производстве вина, значительно преобладали в биомассе штамма Y-3980. Выявлено повышенное содержание отдельных микроэлементов – железа (в биомассе штамма Y-4270), цинка (Y-4270 и Y-3980), меди (Y-4270 и Y-3980). В значительных концентрациях тяжелые металлы оказывают токсическое действие на дрожжи [11], однако угнетения роста и размножения клеток в процессе экс-

перимента не наблюдалось. Кроме того, качество вин находится в прямой зависимости от отношений, сложившихся между различными формами соединений калия, магния и кальция [12].

Известна корреляционная связь между содержанием макро- и микроэлементов в винах и их дегустационной оценкой. Виноматериалы, полученные с использованием штаммов *S. cerevisiae* M-12x, Y-3980 и Y-4270, характеризовались хорошими органолептическими (вкус, букет, цвет) и физиолого-биохимическими показателями [2–4, 10]. Очевидно влияние микроэлементов на бродильную активность и устойчивость исследуемых дрожжей к стрессовым факторам, в последующем – на формирование технологических и органолептических свойств вина.

Нами отмечена физиологическая активность всех исследуемых культур, поэтому представляется актуальным рассмотрение морфологических свойств клеток и гигантских колоний, выращиваемых на твердых средах при одновременном воздействии различных стресс-факторов, и сравнение их со стандартным лабораторным S288c (Y-3315) (рис. 1).

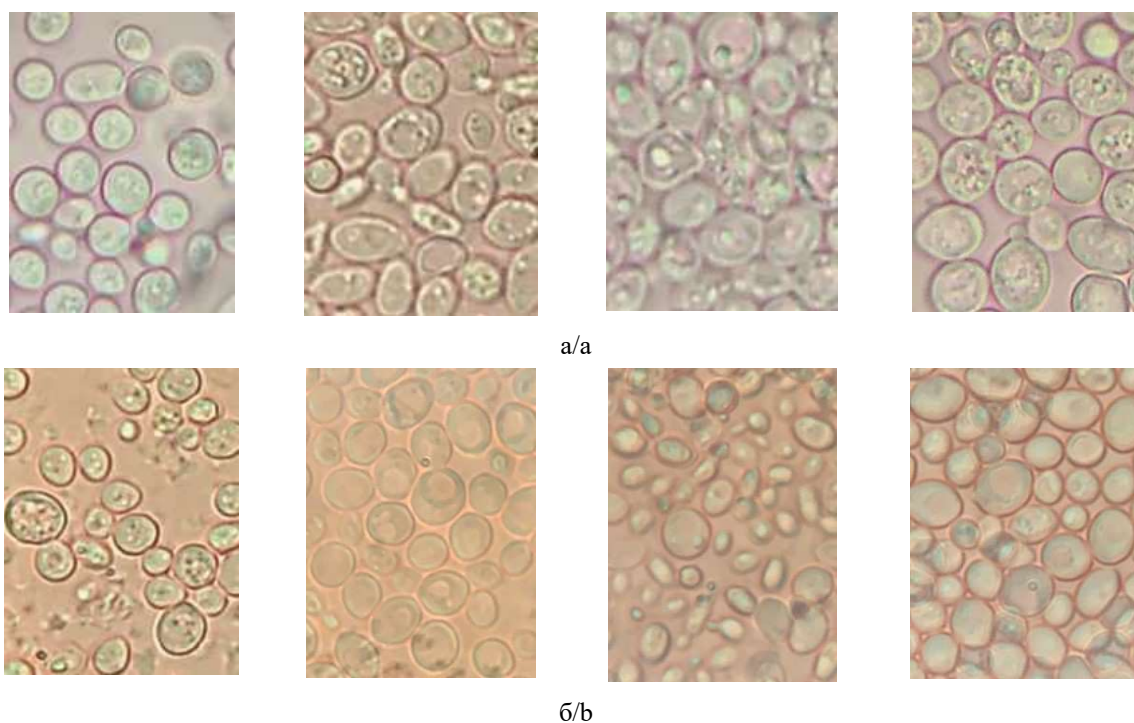


Рис. 1. Клетки (увеличение $\times 1000$, микроскоп Olympus CX-21) штаммов *S. cerevisiae* S288c, Y-3980, Y-4270 и M-12x при выращивании на средах: а – контроль – YPD-агар; б – опыт – YPD-агар, 20 % глюкозы и 12 % этанола. Температура 37 °C / Fig. 1. Cells (magnification $\times 1000$, Olympus CX-21 microscope) of *S. cerevisiae* strains S288c, Y-3980, Y-4270 and M-12x when grown on media: a - control - YPD agar; b - experiment - YPD agar, 20 % glucose and 12 % ethanol. Temperature 37 °C

В процессе брожения для исследуемых штаммов наиболее комфортными считаются различные температуры: 28–30 (S288c), 18–22 (M–12x), 14–22 (Y-3980), 20–32 °C (Y-4270), поэтому возник интерес – как адаптация к повышенной температуре влияет на морфологические параметры дрожжей. В результате изучения одновременного влияния температуры 37 °C, этанола 12 % и глюкозы 20 % в составе твердой среды культивирования обнаружены морфологические особенности, связанные как с функциональным состоянием, так и с индивидуальными свойствами штаммов.

Установлено, что во всех вариантах форма клеток штамма S288c была округлой, M-12x – округло-овальной, при этом их размеры в экстремальных условиях в среднем несколько уменьшались. В условиях стресса наблюдали значительное уменьшение округло-овальных и появление мелких овальных клеток Y-4270; овально-округлые клетки Y-3980 приобретали более округлую форму, и в среднем их размер уменьшался. Параметры гигантских колоний в контрольном варианте несколько отличались, но особый интерес представляет сравнение их размеров (рис. 2).

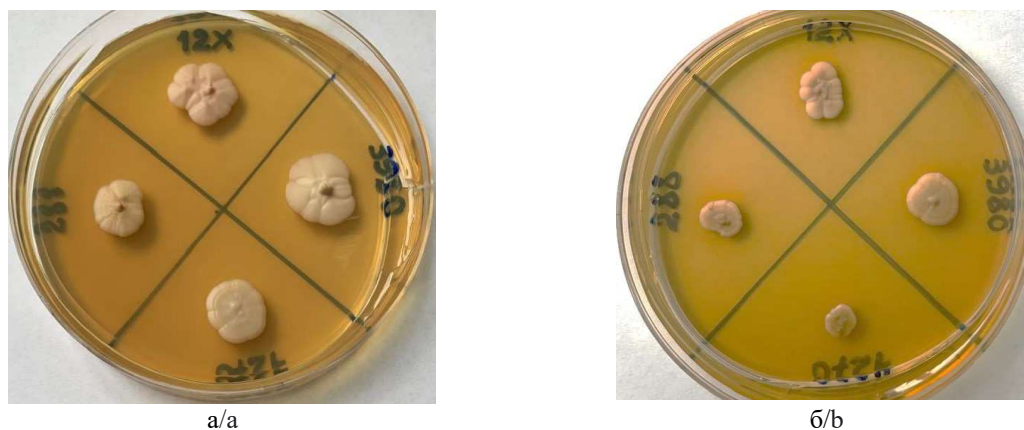


Рис. 2. Гигантские колонии штаммов *S. cerevisiae* S288с, Y-3980, Y-4270 и M-12х при выращивании на средах: а – контроль – YPD-агар; б – опыт – YPD-агар, 20 % глюкозы и 12 % этанола. Температура 37 °С / Fig. 2. Giant colonies of *S. cerevisiae* strains S288с, Y-3980, Y-4270 and M-12х when grown on media: a - control - YPD agar; b - experiment - YPD agar, 20 % glucose and 12 % ethanol. Temperature 37 °С

Винодельческие штаммы оказались более толерантными к температуре 37 °С, в контроле размеры их колоний намного превосходили показатели стандартного лабораторного S288с – в 1,3 (Y-4270), 1,4 (M-12х) и 1,7 раза (Y-3980). Экстремальные значения этанола и глюкозы в опытном варианте способствовали, по сравнению с контролем, изменению цвета и уменьшению в среднем в 1,5 (M-12х, Y-3980, S288с) и 3,0 (Y-4270) раза размера колоний. Наименьшую толерантность в данных условиях проявил штамм Y-4270, наибольшую – штаммы M-12х и Y-3980 (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Зависимость морфологических параметров клеток и гигантских колоний дрожжей *S. cerevisiae* от состава среды культивирования при 37 °С / Dependence of the morphological parameters of cells and giant colonies of the yeast *S. cerevisiae* on the composition of the cultivation medium at 37 °С

Показатель	Штамм			
	S288с	Y-3980	Y-4270	M-12х
Контроль				
Средние размеры колоний, мм	11,6×10,0	15,2×13,0	13,3×11,3	13,7×12,2
Поверхность	Радиально исчерчена	Исчерчена в виде лепестков	Радиально исчерчена	Радиально исчерчена
Профиль	С выпуклым центром	С выпуклым центром	Плоский	Почти плоский
Цвет	Бежевый	Молочно-бежевый	Светло-бежевый	Светло-розовый с бежевым оттенком
Структура	Пастообразная	Пастообразная	Пастообразная	Пастообразная
Размеры клеток, мкм	6×6; 4×4	9×8; 9×7; 8×8; 8×6; 6×6	9×9; 8×8; 8×7; 7×6	9×8; 8×8; 7×7; 6×6
Опыт				
Средние размеры колоний, мм	9,3×8,0	12,5×10,3	7,2×6,8	11,2×10,0
Поверхность	Почти гладкая, по краям изрезана	Радиально исчерчена	Радиальные редкие борозды	Радиально исчерчена
Профиль	С выпуклым центром	С выпуклым центром	Плоский	Плоский
Цвет	Темно-бежевый	Темно-бежевый со светлым краем	Темно-бежевый со светлым краем	Бежевый со светлым краем
Структура	Пастообразная	Пастообразная	Пастообразная	Пастообразная
Размеры клеток, мкм	6×6; 4×4; 3×3	7×7; 6×6; 5×5	6×6; 5×4; 5×3; 3×3	9×8; 8×8; 7×6; 4×4

Заключение

В результате изучения содержания минеральных веществ в биомассе штаммов *S. cerevisiae* М-12х (У-395), У-3980, У-4270 обнаружен идентичный качественный состав; в количественном отношении во всех вариантах преобладали ионы калия. Вероятно, оптимальная концентрация макро- и микроэлементов оказала влияние на устойчивость исследуемых штаммов к экстремальным факторам, что способствовало регуляции определенных физиологических процессов в дрожжевой клетке и в дальнейшем – формированию технологических и органолептических свойств вина. Толерантность дрожжей *S. cerevisiae* М-12х (У-395), У-3980, У-4270 к температуре 37 °С, этанолу 12 % и глюкозе 20 % в составе среды культивирования, обнаруженная в процессе сравнительного исследования, подтверждает стрессоустойчивость штаммов и перспективность использования их в виноделии.

Список источников

1. Луткова Н.Ю., Шаламитский М.Ю., Семенова К.А., Загоруйко В.И. Селекция перспективных штаммов дрожжей для производства терруарных вин // Магарач. Виноградарство и виноделие. 2024. Т. 26, № 2 (128). С. 176–182. EDN: RZDACW.
2. А.с. 1104149 СССР. МПК С 12 G 1/02, С 12 G 1/06, С 12 N 1/16. Штамм дрожжей *Saccharomyces oviformis* Махачкалинская 12х, используемый для производства шампанских виноматериалов и столовых вин / Ш.А. Абрамов, С.Ц. Котенко, А.М. Макуев, О.К. Власова, Р.И. Нахшунов. Заявл. 21.03.1983. Оpubл. 23.07.1984.
3. Пат. 2526493 РФ. МПК С12N1/16; С12G1/06; С12R1/865. Штамм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* для производства шампанского / С.Ц. Котенко, М.М. Садулаев, Ю.Л. Пальян, Э.А. Халилова, Д.А. Аливердиева, Э.А. Исламмагомедова. Заявл. 24.07.2013. Оpubл. 20.08.2014.
4. Пат. 2636024 РФ. МПК С12N1/16; С12G1/00. Штамм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* для производства красных столовых вин / С.Ц. Котенко, Д.А. Аливердиева, М.М. Садулаев, Ю.Л. Пальян, Э.А. Халилова, Э.А. Исламмагомедова, А.А. Абакарова. Заявл. 12.12.2016. Оpubл. 17.11.2017.
5. Walker G. Metals in yeast fermentation processes // *Advances in Applied Microbiology*. 2004. Vol. 54. P. 197–229.
6. Matallana E., Aranda A. Biotechnological impact of stress response on wine yeast // *Lett. Appl. Microbiol.* 2017. Vol. 64, № 2. P. 103–110.
7. URL: <https://vkpm.genetika.ru/katalog-mikroorganizmov/show33235/> (дата обращения: 11.01.2025).
8. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.
9. Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Гасанов Р.З., Абакарова А.А. Содержание минеральных веществ в дрожжах рода *Saccharomyces* в зависимости от условий культивирования // *Вестн. ДНЦ РАН*. 2017. № 65. С. 24–31. EDN: ZMIQCL.
10. Исламмагомедова Э.А., Котенко С.Ц., Халилова Э.А., Абакарова А.А. Минеральный состав красного столового вина, полученного с использованием нового штамма *S. cerevisiae* У-4270 // *Пищевая промышленность*. 2018. № 8. С. 66–69. EDN: XVAKBF.
11. Viviers M., Smith M., Wilkes E., Smith P., Johnson D. The role of trace metals in wine 'reduction' // *Wine & Viticulture J.* 2014. Vol. 29, № 1. P. 38–40.
12. Якуба Ю.Ф., Халафян А.А., Темердашев З.А., Бессонов В.В., Малинкин А.Д. Вкусовая оценка виноградных вин с использованием методов математической статистики // *Вопросы питания*. 2016. Т. 85, № 5. С. 93–99.

References

1. Lutkova N.Yu., Shalamitsky M.Yu., Semenova K.A., Zagoruiko V.I. Selection of promising yeast strains for the production of terroir wines. *Magarach. Viticulture and Winemaking*. 2024;26(2):176-182. (In Russ.). EDN: RZDACW.
2. Abramov Sh.A., Kotenko S.Ts., Makuev A.M., Vlasova O.K., Nakhshunov R.I. *Yeast strain Saccharomyces oviformis Makhachkala 12x used for the production of champagne wine materials and table wines*. Certificate No. 1104149 USSR. Appl. March 21, 1983. Publ. July 23, 1984. (In Russ.).
3. Kotenko S.Ts., Sadulaev M.M., Pal'yan Yu.L., Khalilova E.A., Islammagomedova E.A., Aliverdieva D.A. *Saccharomyces cerevisiae yeast strain for champagne production*. Certificate No. 2526493 RF. Appl. July 24, 2013. Publ. August 20, 2014. (In Russ.).

4. Kotenko S.Ts., Aliverdieva D.A., Sadulaev M.M., Pal'yan Yu.L., Khalilova E.A., Islammagomedova E.A., Abakarova A.A. *Saccharomyces cerevisiae* yeast strain for the production of red table wines. Certificate No. 2636024 RF. Appl. December 12, 2016. Publ. November 17, 2017. (In Russ.).
5. Walker G. Metals in yeast fermentation processes. *Advances in Applied Microbiology*. 2004;54:197-229.
6. Matallana E., Aranda A. Biotechnological impact of stress response on wine yeast. *Let. Appl. Microbiol.* 2017;64(2):103-110.
7. Available from: <https://vkpm.genetika.ru/katalog-mikroorganizmov/show33235/> [Accessed 11th January 2025]. (In Russ.).
8. Lurye Yu.Yu. *Analytical chemistry of industrial wastewater*. Moscow: Chemistry; 1984. 448 p. (In Russ.).
9. Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Gasanov R.Z., Abakarova A.A. The content of mineral substances in yeasts of the genus *Saccharomyces* depending on cultivation conditions. *Bulletin of the DSC RAS*. 2017;(65):24-31. (In Russ.). EDN: ZMIQCL.
10. Islammagomedova E.A., Kotenko S.Ts., Khalilova E.A., Abakarova A.A. Mineral composition of red table wine obtained using a new strain of *S. cerevisiae* Y-4270. *Food Industry*. 2018;(8):66-69. (In Russ.). EDN: XVAKBF.
11. Viviers M., Smith M., Wilkes E., Smith P., Johnson D. The role of trace metals in wine 'reduction'. *Wine & Viticulture Journal*. 2014;29(1):38-40.
12. Yakuba Yu.F., Khalafyan A.A., Temerdashev Z.A., Bessonov V.V., Malinkin A.D. Taste assessment of grape wines using methods of mathematical statistics. *Nutrition Issues*. 2016;85(5):93-99. (In Russ.).

Информация об авторах

Э.А. Исламмагомедова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии ПИБР ДФИЦ РАН.

Э.А. Халилова – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии ПИБР ДФИЦ РАН.

А.А. Абакарова – старший лаборант лаборатории биохимии и биотехнологии ПИБР ДФИЦ РАН.

Information about the authors

E.A. Islammagomedova – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, CIBR DFRC RAS.

E.A. Khalilova – Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, CIBR DFRC RAS.

A.A. Abakarova – Senior Assistant, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, CIBR DFRC RAS.

Статья поступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 15.05.2025; принята к публикации 10.07.2025.
The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 15.05.2025; accepted for publication 10.07.2025.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Материалы конференции

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-150-154>

КРАСОТА И БОГАТСТВО ДОНСКИХ СТЕПЕЙ

**Виктор Аркадьевич Миноранский^{1✉}, Юлия Валерьевна Тимофеевко²,
Марина Владимировна Гриценко³**

^{1, 2} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

^{1, 2, 3} Ассоциация «Живая природа степи», Ростов-на-Дону, Россия

¹ priroda.rostov@yandex.ru ✉

² ymal@sfedu.ru

Для цитирования: Миноранский В.А., Тимофеевко Ю.В., Гриценко М.В. Красота и богатство донских степей // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 3. С. 150–154. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-150-154>

Conference materials

THE BEAUTY AND RICHES OF THE DON STEPPES

Victor A. Minoransky^{1✉}, Yulia V. Timofeenko², Marina V. Gritsenko³

^{1, 2} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

^{1, 2, 3} Association “Wild Nature of the Steppe”, Rostov-on-Don, Russia

¹ priroda.rostov@yandex.ru ✉

² ymal@sfedu.ru

For citation: Minoransky V.A., Timofeenko Ju.V., Gritsenko M.V. The Beauty and Riches of the Don Steppes. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(3):150-154. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-150-154>

В Ростовскую область (РО) опять пришла весна. Положительные температуры, частое появление солнца на голубом небе активизируют живую природу. Еще 09.04.2025 в заповеднике срылся снег, а уже в следующие дни стало тепло. В садах, парках и лесопосадках появились огромные букеты абрикоса, алычи, вишни, черемухи, сирени, терна. Под ними и на открытых местах на фоне нежной зелени травы природа разбросала яркие цветы одуванчиков, весеннего чистяка, нарцисса и других растений. На водоемах держатся кряквы, серые гуси, лысухи, цапли. Шумно в гнездовых колониях грачей, которые насиживают яйца. В древесной растительности перелетают зеленушки, горлинки, вяхири, дятлы. На полях трудится сельскохозяйственная техника, на дачах, улицах, в парках высаживают растения и цветы.

Все это и многое другое – наш родной край. Его мелькавшие поля, степи, островки наблюдали туристы, едущие 11–13 апреля из Таганрога, Азова, Ростова и других городов на фестиваль «Воспетая степь» в заповедник «Ростовский», которому исполнилось 30 лет. Первый экологический фестиваль, охвативший около 300 чел., был организован Ассоциацией «Живая природа степи» (далее – Ассоциация) в 2013 г. на базе Центра редких и ценных животных европейских степей в хут. Кундрюченском Орловского р-на. Праздник настолько понравился людям, что они просили проводить его ежегодно.



С каждым годом фестиваль совершенствовался, увеличивалось количество и расширялась география участников. Основной площадкой стала охранная зона природного заповедника «Ростовский». Наибольшее количество зарегистрированных посетителей (около 15 тыс.) было в 2017 г. (президент РФ объявил его Годом экологии и особо охраняемых территорий (ООПТ)). С 2018 г. количество зарегистрированных участников ограничили (3–5 тыс.). Однако столько же незарегистрированных посетителей, как и учтенных, присутствовало на всех фестивалях из ближних селений, районов, Республики Калмыкии. В 2025 г. были гости с Кубани, Ставрополя, из Москвы, Санкт-Петербурга, Челябинска и многих отдаленных мест. Подобные фестивали в период цветения тюльпанов стали проводиться в Калмыкии.

Организаторы XIII фестиваля в РО (12.04.2025) – правительство РО, минприроды РО, заповедник «Ростовский», Ассоциация, Ростовское областное отделение Русского географического общества (РОО РГО), администрация Орловского района. В его работе участвовали медицинские работники, полиция, Росгвардия, казаки, молодежные добровольческие группы. Традиционно центральная площадка фестиваля, расположенная в открытой степи около визит-центра заповедника, собирала посетителей с 8 ч утра. Люди прибывали по одному, группами, семьями, целыми организациями, через туристические фирмы и на своем транспорте. Участвующим в фестивале структурам предоставили 4 крупных шатра (более 300 м² – каждый), в которых размещались тематические экспозиции с модераторами, баннерами с изображением цветущей степи, интерактивные площадки, мастер-классы, плазменные панели, генераторы и т.д. Около шатров располагались фотозоны, баннеры, плакаты, информационные указатели, правила поведения на природе. По другую сторону большой площадки стояли многочисленные столы с оригинальными экспонатами, сувенирами народного творчества и донскими продуктами. Отдельно находилась сцена для поздравлений, вручения наград, выступлений самодеятельных коллективов.



Минприроды Ро представило экспозицию «Сохраним биоразнообразие Донского края». Здесь экологурысты знакомились с ООПТ региона, новым изданием Красной книги растений и животных, изучали следы животных, кладки яиц птиц и другие экспонаты. На площадке «Равноправие» посетителям предлагали пройти степной экологический диктант. Очень наглядно, полно и хорошо была представлена площадка заповедника, где экологурысты знакомились с достопримечательностями долины Западного Маньча, её природными ресурсами, их использованием и охраной. Посетители могли проверить свои знания об ООПТ Донской земли, получить новую информацию о ценных и краснокнижных видах животных, растений и грибов. Многих экологурыстов привлекала площадка Южного научного центра РАН (ЮНЦ РАН). Она была снабжена наглядными экспонатами, приборами, публикациями. В больших аквариумах плавали живые осетровые. Здесь посетители узнавали о проводимых сотрудниками исследованиях, их научной и практической ценности. Особое внимание на фестивале уделили 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Разные тематические экспонаты предложили народный военно-исторический музей Великой Отечественной войны «Самбекские высоты» и ЮНЦ РАН.



Интересная площадка была у основательницы фестивалей – Ассоциации «Живая природа степи», которая представила РОО РГО. Посетители на ней получили информацию о ценных и редких животных, их происхождении и истории, методах сохранения и восстановления. РОО РГО представило интерактив «Достопримечательности Ростовской области», который стал не только увлекательным для экотуристов, но и полезным, позволяющим лучше узнать свой край. Участники фестиваля с азартом определяли, какие точки притяжения изображены на фишках, и ставили их на карте региона. На этой площадке была освещена деятельность РОО РГО, в том числе и экспедиции членов отделения по интересным в природном и историческом отношении местам. Посетителей привлекли экспонаты экспедиции «Золотые горки» по выявлению исторически возделываемых на Донской земле автохтонных сортов винограда, их выращиванию. Она была приурочена к 270-летию юбилею донского атамана Матвея Платова и прошла «виноградной тропой» вдоль Дона от Цимлянского водохранилища до Азовского моря, обследуя виноградники частных подворий в поисках утерянных сортов. Была собрана, описана и подготовлена к изучению «Золотая коллекция» донских автохтонов из 55 сортов. Результаты экспедиции и атлас «Дорогами донских автохтонов. Виноградарство и виноделие Донского края» представили на этногастрономическом фестивале «Краснозуб Золотовский» в хут. Старозолотовском РО. На экофестивале в заповеднике РОО РГО участники показали свои проекты 2025 г. Среди них особенно выделялся медиапроект «Гении Донской земли», посвящённый выдающимся личностям, обогатившим культурное, образовательное, научное, технологическое и экономическое наследие региона и всей страны.

На площадке Ростовского зоопарка – экспонаты животных, их фотографии. Большое внимание было уделено мастер-классам, которыми активно пользовалась не только молодежь, но и взрослые участники. Свои площадки представили Южный федеральный университет, Донской государственный технический университет, Союз женщин России, Ростовводоканал и другие организации. В одном из шатров была организована концертная программа. Коллективы Орловского района, Центра развития творчества детей и юношества г. Новошахтинска, центра развития детей и юношества с ОВЗ «Луч надежды» г. Таганрога заряжали зрителей положительными эмоциями, воспевали красоту и самобытность донской природы.

Не менее интересной и захватывающей чувства, эмоции и знания на фестивале была природа, которую посетители видели вокруг палаток в естественной степи, в окрестности оз. Грузское, Лопуховатое, Маныч-Гудило. Экскурсии в цветущую природу стали самыми востребованными.

Покрытая изумрудным зеленым ковром с яркими красными, желтыми, белыми и иными цветами тюльпанов, ирисов и других трав степь, чистый с запахом свежего травостоя весенний воздух, наполненный голосами поющих высоко в небе жаворонков, пролетающие журавли, лебеди, гуси, хищники отличают охраняемую природу заповедника. На земле живут разные пауки, клопы, жу-желицы, сотни видов иных членистоногих, ужи, полозы. Встречаются гнезда птиц, норы поле-вок, мышей, других млекопитающих. Здесь обитают тысячи видов животных – и далеко не все известны даже ученым. Встречаются и ядовитые – степная гадюка, иксодовые клещи и некоторые другие. Некоторые группы посетили питомник Ассоциации, где в степи наблюдали за жизнью лам, верблюдов, канн, сайгаков, оленей Давида, бизонов, зебр, лошадей Пржевальского и других редких и ценных животных. На острове Водный пасется уникальное стадо мустангов (одичавших лоша-дей), которых туристы фотографировали и делали селфи, узнавали историю их появления здесь и образ жизни.

До бесконечности можно говорить о красоте и природных богатствах донской степи. фести-валь стал настоящим праздником для всех, кто любит природу и хочет больше о ней узнать. Он показал, что экологический туризм – это не только возможность отдохнуть на природе, но и спо-соб узнать больше о её богатстве и разнообразии, сохранении и разумном использовании. Одни экотуристы знакомятся с естественной заповедной природой впервые, другие уже бывали в за-поведнике, а третьи посещают его регулярно. Авторы встретили здесь людей, которые были на первых фестивалях, и посетили его в 2025 г., некоторые уже с детьми и внуками. Все они счита-ют, что знакомство с естественной природой положительно влияет на их состояние и здоровье, значительно расширяет знания о биоресурсах, заставляет ценить и сохранять природные богат-ства донских степей. Фестиваль хорошо осветили центральные и региональные телеканалы и пе-чатные СМИ, что позволило познакомиться с ним населению региона и страны.

Информация об авторах

В.А. Миноранский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоологии ЮФУ; президент Ассоциации «Живая природа степи».

Ю.В. Тимофеевко – ассистент кафедры зоологии ЮФУ; научный сотрудник ассоциации «Живая при-рода степи».

М.В. Гриценко – научный сотрудник Ассоциации «Живая природа степи».

Information about the authors

V.A. Minoransky – Doctor of Science (Agricultural Science), Professor of the Department of Zoology, SFedU; President of the Association “Wild Nature of the Steppe”.

Yu.V. Timofeenko – Assistant of the Department of Zoology, SFedU; Researcher, Association “Living Nature of the Steppe”.

M.V. Gritsenko – Researcher, Association “Living Nature of the Steppe”.

ШТРИХИ К ПОРТРЕТУ

TOUCHES TO THE PORTRAIT

Персоналии

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-155-159>

Игорь Борисович Симоненко
(к 90-летию со дня рождения)

Personalities

Igor Borisovich Simonenko
(to the 90th Anniversary)

16 августа исполняется 90 лет со дня рождения Игоря Борисовича Симоненко (16.08.1935–22.03.2008) – выдающегося российского математика, заслуженного деятеля науки РФ, профессора, доктора физико-математических наук. Символично, что 90-летие со дня рождения Игоря Борисовича отмечается в год 110-летия университета, служению которому он посвятил свою жизнь.

На первый курс физико-математического факультета РГУ он поступил в 1953 г. после окончания Луганского машиностроительного техникума. Это обстоятельство не позволило ему решиться на участие в конкурсе для поступления на очное отделение физмата, и первый курс студент Симоненко обучался на заочном отделении. Успешно окончив его, он перешел на дневное отделение физмата РГУ.

Становление ученого. Научным руководителем Игоря Борисовича стал выдающийся математик, профессор Федор Дмитриевич Гахов, переехавший в год поступления И.Б. Симоненко в РГУ из Казани в Ростов. Годы учебы Игоря Борисовича на физмате совпали, возможно, с самой яркой страницей развития математики и механики в Ростовском университете, связанной со становлением научных школ Ф.Д. Гахова, М.Г. Хапланова и И.И. Воровича.

Одновременно на физмате под их руководством учились ставшие затем выдающимися учеными В.И. Юдович, В.П. Захарюта, А.Л. Фуксман, Г.С. Литвинчук, Э.И. Зверович и др. В этой когорте Игорь Борисович Симоненко был, пожалуй, одной из первых скрипок. Он не просто блестяще окончил в 1958 г. физмат, но и получил медаль на Всесоюзном конкурсе студенческих научных работ, а результаты его дипломной работы были опубликованы в 1959 г. в «Докладах АН СССР» [1], главном научном журнале СССР.



В 1961 г., через 3 года после окончания физмата, Игорь Борисович защитил под руководством Ф.Д. Гахова кандидатскую диссертацию и приступил к работе в качестве научного сотрудника только что созданного ВЦ РГУ. Это позволило ему интенсивно продолжить не только научную работу в основном своем научном направлении – теории сингулярных интегральных операторов, но и вместе с коллегами выполнить большой цикл прикладных работ по задачам электростатики [2–7].

Параллельно Игорь Борисович начинает цикл работ по вибрационной конвекции. Здесь ему и его ученице С.М. Зеньковской удалось теоретически обосновать возможность и условия возникновения вибрационной конвекции в невесомости [8, 9]. Эти исследования нашли свое подтверждение в реальных экспериментах, проведенных в космосе.

Основные результаты Игоря Борисовича, полученные в 1961–1967 гг., стали основой его докторской диссертации «Операторы локального типа и некоторые другие вопросы теории линейных операторов», защищенной в 1967 г. в СПбГУ.

Работы И.Б. Симоненко составляют основу того, что сегодня называют локальной теорией Симоненко, или теорией операторов локального типа. Первой «взрывной» стала статья в «Докладах АН СССР» [10]. Подробно она изложена в обширной публикации, состоящей из двух частей [11, 12].

Я не случайно написал о «взрывном» характере результатов И.Б. Симоненко. На эти работы обратили внимание крупнейшие специалисты в области теории операторов – М.Г. Крейн, И.Ц. Гохберг и выдающийся специалист по уравнениям математической физики С.Г. Михлин. Именно они заявили, что эти результаты соответствуют ученой степени доктора наук, а С.Г. Михлин стал оппонентом Игоря Борисовича по его докторской диссертации.

Опубликованы основные результаты докторской диссертации в 4 статьях [10–13], но каких Нынешние положения о диссертационных работах не позволили бы 32-летнему талантливому математику стать доктором наук. Эхо диссертации И.Б. Симоненко в виде выдающихся публикаций, вышедших уже после защиты докторской диссертации, составляют фундаментальные работы [14–16].

Думаю, что сам Игорь Борисович понимал силу и мощь полученных им научных результатов. Свидетельством этого является и смелое название его статьи: «Новый общий метод исследования линейных операторных уравнений типа сингулярных интегральных уравнений».

Становление учителя. После завершения докторской диссертации Игорь Борисович – уже известный, сложившийся математик – возвращается в 1966 г. с ВЦ РГУ на механико-математический факультет и приступает к работе доцентом кафедры теории функций и функционального анализа, которой заведовал профессор М.Г. Хапланов. Михаил Григорьевич был не только выдающимся математиком, но и опытным руководителем, возглавлявшим факультет в трудные военные и послевоенные годы.

Он понимал, что талантливому молодому ученому нужна собственная научная школа, именно такую задачу он и поставил перед новым сотрудником кафедры – создать свой научный семинар.

Первыми семинаристами Игоря Борисовича стали В.Н. Семенюта, Д. Райкин, В.С. Пилиди, Л.И. Сазонов, аспирант кафедры дифференциальных и интегральных уравнений В. Рабинович и автор этих строк.

В последующие годы семинар рос не только численно, но и качественно. По мере того как старшие семинаристы защищали свои диссертации, их ученики также становились семинаристами.

Постепенно семинар стал известен на всю страну. Его докладчиками были выдающиеся математики С.Г. Михлин и И.Ц. Гохберг, П.Е. Соболевский, Г.С. Литвинчук, крупный немецкий математик Б. Зильберман и др. Докторские диссертации известных математиков М.А. Шубина, Р.В. Дудучавы, А.П. Солдатова, А.Б. Антоневица проходили апробацию на семинаре, свои диссертации докладывали И.М. Спитковский, Ю.И. Карлович, А.А. Килбас, В.Г. Кравченко. Постоянными докладчиками семинара были и С.Г. Самко, Н.К. Карапетянц, Б.С. Рубин.

Круг учеников Игоря Борисовича не только чрезвычайно широк, но и разнообразен по научным направлениям. Названные выше публикации стали в дальнейшем началом целых научных школ его учеников. Публикация [15] послужила отправной точкой и положила начало научной школе В.С. Рабиновича. Сегодня В.С. Рабинович – известный ученый, профессор Национального политехнического университета в Мехико.

Работы И.Б. Симоненко по многомерным сверткам [16] послужили основой для блестящей докторской диссертации его ученика В.С. Пилиди «Бисингулярные операторы и операторы близких к ним классов» (1990).

Названные выше «взрывные» публикации давали критерии нетеровости целых классов операторов типа свертки и естественно возникал следующий вопрос – об индексе таких операторов. Этой задачей Игорь Борисович щедро поделился со своими учениками В.Н. Семенютой и В.М. Деундяком.

Активные научные контакты, возникавшие на научном семинаре Игоря Борисовича, позволили создать А.В. Козаку поразительный по своей красоте симбиоз проекционных методов (И.Ц. Гохберг, И.А. Фельдман) и теории операторов локального типа, известный теперь как проекционный метод А.В. Козака.

Исследования И.Б. Симоненко по методу осреднения и его приложениям к задачам гидродинамики развивает ученик И.Б. Симоненко и В.И. Юдовича В.Б. Левенштам (докторская диссертация «Метод усреднения в теории нелинейных параболических уравнений с приложениями к задачам гидродинамики» (1998)).

В 80-е гг. И.Б. Симоненко возглавил научные работы по математическим задачам гидроакустики, важному научному направлению не только с теоретической, но и с практической точки зрения. Это ещё более расширило круг не только его научных интересов, но и научных интересов его учеников и последователей.

По этой тематике были защищены 3 кандидатские диссертации (авторы: А.В. Олифер – «Асимптотические методы в теории плавнонерегулярных открытых волноводов» (1989), М.Э. Абрамян – «Хорошо обусловленный прямой метод расчета волноводов с резкими граничными неоднородностями» (1992), С.С. Михалкович – «Асимптотика акустических полей в волноводах с локальными сингулярными возмущениями» (1994)) и докторская диссертация (С.М. Грудский – «Сингулярные интегральные операторы с бесконечным индексом и некоторые их применения к задачам теории дифракции» (1995)).

Заведующий кафедрой. В 1969 г. Игорь Борисович Симоненко, молодой доктор наук, создающий свою научную школу, возглавил важнейшую кафедру мехмата – вычислительной математики. На этой кафедре были сосредоточены курсы вычислительной математики, алгебры, дискретной математики, ЭВМ и программирования. Игорь Борисович уже имел репутацию ученого, способного получать глубокие результаты в области как фундаментальной математики, так и прикладной, в том числе вычислительной. На кафедре работали уже достаточно опытные и квалифицированные доценты Е.Л. Литвер, ЛА. Чикин, В.К. Наталевич, Г.В. Аржанов, С.В. Жак, В.И. Юдович, В.Б. Дыбин, которые оказали своему новому заведующему необходимую помощь и поддержку.

Начало педагогической деятельности И.Б. Симоненко совпало с периодом бурного развития факультета. На его базе был открыт специальный факультет прикладной математики (ФПМ) для ускоренной переподготовки (в течение 2 лет) специалистов с высшим техническим образованием в математиков-прикладников, специалистов со средним техническим образованием – в математиков-прикладников с высшим образованием (срок обучения – 3 года). Первая задача была сложной, но разрешимой, а вторая оказалась практически неразрешимой. ФПМ, просуществовавший несколько лет, был закрыт. Ему на смену пришло отделение прикладной математики, существующее до сих пор.

Основная учебная нагрузка на ФПМ, а затем на отделении прикладной математики пришла на кафедру И.Б. Симоненко, которая могла стать неуправляемой и захлебнуться в разрастающемся объеме учебной работы.

В 1972 г. Игорь Борисович убедил ученый совет, руководство факультета и университета в целесообразности ее разделения. На базе кафедры вычислительной математики было создано три кафедры: алгебры и дискретной математики, вычислительной математики (ныне – кафедра вычислительной математики и математической физики), математического обеспечения ЭВМ (ныне – кафедра прикладной математики и программирования). Их возглавили И.Б. Симоненко, В.И. Юдович, Г.В. Аржанов.

Именно кафедра алгебры и дискретной математики стала настоящим детищем И.Б. Симоненко, редким сочетанием опыта и молодости. На кафедре работали опытные преподаватели: Е.Д. Литвер, В.К. Наталевич, В.В. Бублик, В.Б. Дыбин, М.Р. Уховский, А.Г. Авдейчик.

Игорь Борисович смело взял курс на молодежь. На кафедру пришли молодые сотрудники – его ученики, ученики его учеников, ученые с других кафедр, некоторые уже защитившие кандидатские диссертации. Тематика научных направлений расширялась и углублялась.

Возглавив кафедру, Игорь Борисович взял на себя, на мой взгляд, неразрешимую, но решенную им задачу – прочесть и тем самым поставить все основные курсы кафедры: алгебру, дискретную математику, математический анализ. Читая эти курсы, он не только определял их содержание, но и создавал команды тех, кто сможет взять ведение курса на себя, параллельно вел для каждой команды методический семинар.

В последующем Игорь Борисович сосредоточился на курсе математического анализа для математиков-прикладников. Его команду по этому курсу представляли В.С. Рабинович, А.В. Козак, затем в неё включились М.Э. Абрамян и В.Г. Яновер. В команде по курсу алгебры оказались В.Н. Семенюта, В.С. Пилиди, Я.М. Ерусалимский, И.А. Чернявская. Сегодня в этой команде – и В.Б. Левенштам, и В.Д. Кряквин. В команду по дискретной математике вошли А.Г. Авдейчик, Я.М. Ерусалимский, А.И. Хейфиц, И.А. Чернявская. Сегодня в этой команде состоит и В.А. Скоходов.

Идеи и методические воззрения И.Б. Симоненко на курс дискретной математики послужили основой для учебных пособий [17–21].

Последние годы жизни Игорь Борисович интенсивно работал над курсом лекций по математическому анализу, успев опубликовать две части этого пособия.

К 90-летию И.Б. Симоненко А.В. Козак и В.Д. Кряквин подготовили и опубликовали в издательстве ЮФУ курс лекций И.Б. Симоненко [22], ставший таким образом последним (к сожалению, не прижизненным), завершившим список работ И.Б. Симоненко, включающий таким образом 231 публикацию.

Научные и педагогические заслуги Игоря Борисовича высоко оценены. В 1998 г. ему было присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки Российской Федерации, Международный научный фонд поддержки естественно-научного образования присвоил ему звание почетного профессора, 70-летие Игоря Борисовича стало событием международного уровня. Его юбилею был посвящен специальный выпуск журнала *Operator Theory: Advances and Applications* [23].

Семь учеников Игоря Борисовича стали докторами наук: В.С. Рабинович, В.С. Пилиди, В.Б. Левенштам, С.М. Грудский, Я.М. Ерусалимский, А.Н. Карапетянц, О.Г. Авсянкин, 24 ученика – кандидатами наук: Э.М. Саак (1967), С.М. Зеньковская (1971), В.Н. Семенюта (1972), В.С. Пилиди (1972), Л.О. Родэ (1972), В.М. Деундяк (1976), Л.П. Коледов (1976), М.П. Бородицкий (1976), Я.М. Ерусалимский (1976), В.Б. Левенштам (1977), С.Л. Эдельштейн (1980), И.В. Куликов (1981), В.Г. Яновер (1982), П.Н. Николенко (1983), Я.С. Сойбельман (1985), И.М. Фалькович (1986), С.П. Гордеев (1986), В.В. Наумов (1987), В.А. Стукопин (1988), А.В. Олифер (1989), М.Э. Абрамян (1992), С.С. Михалкович (1994), Т.В. Богачёв (2000), Е.А. Максименко (2004). Несомненно, И.Б. Симоненко оказал существенное влияние на формирование мехматовских докторов наук С.Г. Самко, Н.К. Карапетянца и Л.И. Сазонова.

Игоря Борисовича отличала исключительная добросовестность и принципиальность в научной и педагогической деятельности. Предъявляя высокие требования к своим научным результатам, он добивался этого и от своих учеников. Этого критерия он придерживался и в оценке своих коллег. Знаю несколько примеров несостоявшихся диссертаций из-за принципиальных ошибок, обнаруженных в них И.Б. Симоненко.

Жизни и творчеству И.Б. Симоненко посвящены публикации [24–26].

Список источников

1. Симоненко И.Б. Краевая задача Римана с непрерывным коэффициентом // Докл. АН СССР. 1959. Т. 124, № 2. С. 278–281.
2. Захарюта В.П., Симоненко И.Б., Юдович В.И., Шацких Л.С. Функция Грина для области с диэлектрическим слоем // Изв. вузов. Электромеханика. 1964. № 9. С. 1052–1056.
3. Захарюта В.П., Симоненко И.Б., Юдович В.И. Метод точечных зарядов для расчета емкостей // Изв. вузов. Электромеханика. 1964. № 11. С. 1305–1310.

4. Захарюта В.П., Симоненко И.Б., Юдович В.И. Вычисление емкостей трех бесконечных полосок // Изв. вузов. Электромеханика. 1965. № 1. С. 20–23.
5. Захарюта В.П., Симоненко И.Б., Юдович В.И. Приближенный метод вычисления емкостей систем проводников, расположенных на диэлектрическом слое // Изв. вузов. Электромеханика. 1965. № 3. С. 247–253.
6. Захарюта В.П., Симоненко И.Б., Чекулаева А.А., Юдович В.И. Емкость круглого диска на диэлектрическом слое // Изв. вузов. Электромеханика. 1965. № 5. С. 487–494.
7. Захарюта В.П., Симоненко И.Б., Чебукова Е.С., Юдович В.И. Емкость двух прямоугольников // Изв. вузов. Электромеханика. 1965. № 7. С. 727–732.
8. Зеньковская С.М., Симоненко И.Б. О влиянии вибрации высокой частоты на возникновение конвекции // Механика жидкости и газа. 1966. № 5. С. 51–56.
9. Зеньковская С.М., Симоненко И.Б. Исследование влияния вибраций высокой частоты на возникновение конвекции // Третий Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике: аннотации докл. М.: Наука, 1968. С. 137.
10. Симоненко И.Б. Новый общий метод исследования линейных операторных уравнений типа сингулярных интегральных уравнений // Докл. АН СССР. 1964. Т. 158, № 4. С. 790–793.
11. Симоненко И.Б. Новый общий метод исследования линейных операторных уравнений типа сингулярных интегральных уравнений. I. // Изв. АН СССР. Серия мат. 1965. Т. 29, № 3. С. 567–586.
12. Симоненко И.Б. Новый общий метод исследования линейных операторных уравнений типа сингулярных интегральных уравнений. II. // Изв. АН СССР. Серия мат. 1965. Т. 29, № 4. С. 757–782.
13. Симоненко И.Б. Сингулярные интегральные уравнения с непрерывным и кусочно-непрерывным символом // Докл. АН СССР. 1964. Т. 159, № 2. С. 279–282.
14. Симоненко И.Б. Операторы типа свертки в конусах // Докл. АН СССР. 1967. Т. 176, № 6. С. 1251–1254.
15. Симоненко И.Б. Операторы типа свертки в конусах // Мат. сб. 1967. Т. 74, № 2. С. 298–313.
16. Симоненко И.Б. О многомерных дискретных свертках // Мат. исследования. 1968. Т. 3, № 1. С. 108–122.
17. Ерусалимский Я.М. Дискретная математика: теория, задачи, приложения. М.: Вузовская книга, 2010. 288 с.
18. Ерусалимский Я.М. Дискретная математика: теория и практикум. СПб.: Лань, 2022. 476 с.
19. Козак А.В., Пилиди В.С. Линейная алгебра. М.: Вузовская книга, 2005. 215 с.
20. Кряквин В.Д. Линейная алгебра в задачах и упражнениях. М.: Вузовская книга, 2007. 589 с.
21. Ерусалимский Я.М., Чернявская И.А. Алгебра и геометрия: теория и практикум. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. 410 с.
22. Симоненко И.Б. Лекции по математическому анализу. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2024. 458 с.
23. Erusalimsky Ya., Gohberg I., Grudsky S.M., Rabinovich V., Vasilevski N., eds. Modern Operator Theory and Applications. The Igor Borisovich Simonenko Anniversary Volume. Basel: Birkhauser Verlag, 2006. Vol. 170. 256 p.
24. Erusalimsky Ya. Life and Work of Igor Borisovich Simonenko // Modern Operator Theory and Applications. The Igor Borisovich Simonenko Anniversary Volume. Basel: Birkhauser Verlag, 2006. Vol. 170. P. 1–2.
25. Грудский С.М., Ерусалимский Я.М., Пилиди В.С., Рабинович В.С., Самко С.Г., Штейнберг Б.Я. Игорь Борисович Симоненко (1935–2008) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2009. № 1 (149). С. 140.
26. Ерусалимский Я.М. Написано для себя и для Интернета: сб. рассказов, стихов. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. 129 с.

Я.М. Ерусалимский

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Персоналии

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-160-161>

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ГАВРИШИН (к 85-летию)

Personalities

ANATOLY IVANOVICH GAVRISHIN (to the 85th Anniversary)



15 июля 2025 г. исполнилось 85 лет Анатолию Ивановичу Гавришину – доктору геолого-минералогических наук, профессору кафедры прикладной геологии Южно-Российского государственного политехнического университета (ЮРГПУ) им. М.И. Платова, академику РАЕН и РАЕ.

Он родился 15 июля 1940 г. на Дону в семье горного инженера, окончил с серебряной медалью среднюю школу № 3 г. Новочеркаска и в 1962 г. – с отличием Новочеркасский политехнический институт (НПИ). В студенческие годы активно сотрудничал с институтской многотиражкой (более 100 публикаций) и литературной группой.

Свой трудовой путь Анатолий Иванович начал в Центральной геохимической партии «Уралгеолуправление» (г. Свердловск). Он выполнял работы по обобщению гидрогеохимических данных по Уральскому региону, осуществлял геохимические поиски месторождений в регионе и стал соавтором

оригинальной «Прогнозной геохимической карты Урала». В 1966–1970 гг. обучался в заочной аспирантуре НПИ и защитил кандидатскую диссертацию. С 1971 г. А.И. Гавришин по конкурсу перешел работать в ЮРГПУ (НПИ).

Анатолий Иванович – крупный, известный в России и за рубежом ученый в области математической геологии, гидрогеохимии и проблем окружающей среды. Им впервые в мировой практике развиты и обобщены основы учения о качестве геохимической информации, выведен новый статистический критерий «зет-квадрат» (z^2) и реализованы цифровые компьютерные технологии классификации многомерных наблюдений (G-метод), которые являются важным элементом искусственного интеллекта.

Результаты его исследований представлены более чем в 400 научных и учебно-методических публикациях, в том числе в 20 монографиях, учебных пособиях, брошюрах и более чем в 300 докладах на научных конференциях (94 – международные). Более 100 работ опубликовано им в России и за рубежом в соавторстве с зарубежными коллегами (Италия, Франция, США, Германия) при обобщении гидрогеологических, космохимических, астрофизических, дистанционных и других видов данных по Земле, Луне, Марсу, Юпитеру, кометам, астероидам и в дальнем космосе. Книги А.И. Гавришина были представлены и награждены золотыми медалями на международных книжных выставках во Франкфурте-на-Майне, Москве, Париже, Барселоне, Нью-Йорке, Вене, Гонконге (КНР) и др.

Анатолий Иванович прошел годичную научную стажировку в Римском университете. Им выполнен цикл исследований в рамках международного 30-летнего научно-технического сотрудничества с Астрофизическим институтом и Институтом физики межпланетного космического пространства (Италия, Рим); изучены и описаны гидрогеохимические закономерности формирования поверхностных, подземных и шахтных вод Восточного Донбасса и перспективы обнаружения нефтегазовых скоплений в регионе. Он известен как ответственный редактор 18 межвузовских сборников научных трудов и член редколлегии журналов «Успехи современного естествознания», «Современные наукоемкие технологии» и Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics.

За успехи в научно-педагогической деятельности Анатолий Иванович отмечен отечественными и зарубежными наградами и званиями. Ему присвоено 24 почетных и научных звания: заслуженный работник высшего образования РФ, заслуженный деятель науки и образования РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, отличник разведки недр, заслуженный профессор ЮРГПУ, лауреат премии им. Н.Н. Зинина и др.

Анатолий Иванович награжден 20 орденами и медалями: орденом «За заслуги перед Отечеством» II степени, золотой медалью «За выдающиеся достижения» – Gold Medal for Exceptional Achievements (Бельгия), орденом «Трудом и знанием» – Labore et Scientia (Европейский научно-промышленный консорциум), орденом «Петр Великий» – Peter the Great, орденом «Александр Великий» – Alexander the Great, золотой медалью «Европейское качество» – European Quality, медалью «Вильгельм Лейбниц» – Wilhelm Leibniz, золотой медалью им. В.И. Вернадского и др.

Научная биография А.И. Гавришина опубликована во многих изданиях: «Геологи Нижнего Дона», «Энциклопедия г. Новочеркаска», «Ученые России», «Ученые России: интернет-энциклопедия»: www.famous-scientists.ru, всемирной энциклопедии Who is Who in the World – «Кто есть кто в мире» и др.

В последнее время А.И. Гавришин большое внимание уделяет проблемам влияния микроэлементного состава реголитов на здоровье будущих колонистов на Луне и публикации мемуаров («Мемуары юмориста», «Юношеская сага» и «Итальянская эпопея» (М.: Де Либри, 2024)).

Редколлегия журнала, коллеги, ученики и друзья поздравляют Анатолия Ивановича с юбилеем и желают крепкого здоровья и новых творческих успехов!

Г.В. Рябов, В.Е. Закруткин

Персоналии

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-3-162-163>

МИХАИЛ ИВАНОВИЧ ЧЕБАКОВ
(к 80-летию)

Personalities

MIKHAIL IVANOVICH CHEBAKOV
(to the 80th Anniversary)



7 августа 2025 г. исполнилось 80 лет главному научному сотруднику Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, известному специалисту в области механики контактных взаимодействий, доктору физико-математических наук, профессору Михаилу Ивановичу Чебакову.

М.И. Чебаков поступил в Ростовский госуниверситет в 1963 г. и с тех пор, с двухгодичным перерывом на службу в рядах Советской армии после первого курса, его жизнь и трудовая деятельность неразрывно связаны с Ростовским госуниверситетом, ныне – Южным федеральным университетом.

Окончив в 1970 г. механико-математический факультет РГУ по специальности «механика», он поступил в аспирантуру на кафедру теории упругости. С момента образования Научно-исследовательского института механики и прикладной математики (НИИМиПМ) в

РГУ Михаил Иванович – его сотрудник. После заочной аспирантуры М.И. Чебаков защитил кандидатскую диссертацию под руководством профессора В. М. Александрова.

Михаил Иванович в университете работал на различных научных должностях. Продолжительное время в НИИМиПМ он занимал должность заведующего отделом механики контактных взаимодействий, позднее являлся заведующим лабораторией механики деформируемых тел и конструкций Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Многолетняя научная работа Михаила Ивановича в области механики контактных взаимодействий и теории интегральных уравнений была подытожена в его докторской диссертации «Аналитические и численно-аналитические методы решения контактных задач теории упругости». Им опубликовано около 330 научных работ, в том числе 3 монографии, посвященные различным контактными задачам. Одна из них вышла в свет в центральном издательстве «ФИЗМАТЛИТ» (Москва) при поддержке РФФИ, вторая опубликована в Издательстве РГУ и рекомендована учебно-методическим объединением вузов по классическому университетскому образованию РФ в качестве учебного пособия.

М.И. Чебаков – авторитетный ученый в области механики деформируемого твердого тела, он регулярно выступает с докладами на российских и международных научных конференциях и съездах.

Михаил Иванович принимал активное участие в выполнении научных тем различного уровня. Многие годы он являлся руководителем базовых бюджетных тем университета, а также темы, финансируемой Государственным комитетом СССР по науке и технике, под его руководством выполнено несколько научных тем при поддержке РФФИ, международный российско-болгарский грант РФФИ, европейский грант. Он был исполнителем двух издательских грантов РФФИ, руководителем международной научной темы, финансируемой ИНТАС, стипендиатом германского фонда академических обменов (ДААД).

Он выступал координатором с российской стороны большого международного проекта Седьмой рамочной программы Европейского союза (2012–2016 гг.) с участием ученых Польши, Румынии, Болгарии, Латвии, Украины и Белоруссии. Этот проект был связан с разработкой методов диагностики, контроля прочности и способов ремонта магистральных нефте- и газопроводов.

Отметим, что Михаил Иванович принимал активное участие в подготовке бакалавров-механиков на мехмате ЮФУ, читал лекции по механике контактных взаимодействий. Свой богатый научный и жизненный опыт он использует при оценке достижений кадров высшей квалификации, являясь членом диссертационного совета по механике деформируемого твердого тела на родном факультете.

Развивая идеи выдающихся ученых академика И.И. Воровича и профессора В.М. Александрова, М.И. Чебаков разработал эффективные аналитические и численные методы решения различных типов интегральных уравнений, парных интегральных уравнений и парных рядов-уравнений, на их основе им созданы новые подходы к решению широкого класса статических и динамических задач механики контактных взаимодействий. Многие его исследования имеют практическую направленность, связанную с разработкой методов расчета таких трибосистем, как подшипники скольжения, зубчатые передачи, тормозные системы, рельс – колесо и др.

В настоящее время М.И. Чебаков продолжает научную работу в области контактных взаимодействий, в частности, в последние годы его научные исследования связаны с контактными задачами для многослойных оснований, для пористоупругих структур.

К своему юбилею Михаил Иванович подошел в отличной форме, накопив капитал бесценного научного опыта и жизненной мудрости, специальных знаний, навыков научного исследователя.

От всей души поздравляем юбиляра и желаем ему новых творческих успехов, долголетия и исполнения желаний!

М.И. Карякин, А.О. Ватульян

Коллектив редакции и редколегия журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» сердечно поздравляют нашего многолетнего автора и рецензента с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, счастья, долголетия и неиссякаемой энергии для новых свершений на благо отечественной науки!

ЛЮБОВЬ СЕМЕНОВНА ВОРОВИЧ

LYUBOV SEMENOVNA VOROVICH

24 августа 2025 г. – юбилейная дата в жизни Любове Семеновны Ворович, кандидата физико-математических наук, научного редактора журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» серии «Естественные науки».

Более 30 лет назад, имея за спиной большой стаж научно-педагогической деятельности в Ростовском Инженерно-строительном институте (ныне ДГТУ), она стала членом нашего коллектива и зарекомендовала себя прекрасным работником. Её всегда отличали неизменная доброжелательность, огромный кругозор, готовность подставить плечо в трудную минуту.

Кроме того, она красивая женщина, остроумная собеседница, надежный друг, в чем не раз убеждались и члены редколлегии, и авторы (особенно молодые), и сотрудники.



Ректор РГУ Ю.А. Жданов и Любовь Семеновна с мужем И.И. Воровичем (2000 г.)

*Коллеги, члены редколлегии серии «Естественные науки» желают нашей дорогой Любове Семёновне крепкого здоровья, творческого долголетия, а также внимания, тепла и поддержки дорогих ей людей.
Мы Вас очень любим и ценим!*

Над номером работали: Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, О.В. Назаренко, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко

Подписано в печать 29.09.2025. Выход в свет 30.09.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 19,06. Уч.-изд. л. 19,45. Тираж 250 экз. Заказ № 10128.

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, адрес в Интернете: 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) 243-41-66

Magazine released: L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, O.V. Nazarenko, N.G. Shatravkina, M.S. Shipitko

Signed print September 29, 2025. The publication September 30, 2025. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 19.06. Publ. sign. 19.45. Edition 250 copies. Order number 10128.

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@sfedu.ru, Web Address: www.izvestiya.sfedu.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) 243-41-66

**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. 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. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

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.

Е-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru