

ISSN 1026–2237

DOI 10.18522/1026–2237

*ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ*

50
лет

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2023

4

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, чл.-корр. РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
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, Corresponding Member, Russian Academy of Education, Doctor of Economics, Professor, Southern Federal University, Russia
V.E. Zakrutkin - Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
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: 10.18522/1026-2237-2023-4

*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
Издаётся с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 4 (220) 2023 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. 4 (220) 2023*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Слово главного редактора: о юбилее

The Word of the Editor-In-Chief: About the Anniversary

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. О резонансах академика И.И. Воровича в контактных задачах с деформируемым штампом в сейсмологии 4
Бештоков М.Х. Разностная схема повышенного порядка аппроксимации для уравнения Аллера с переменными коэффициентами 13
Жуков М.Ю., Цывенкова О.А. Стационарная вращательно-симметричная конвекция при изотакхофорезе в круговой цилиндрической области с недеформируемой свободной непроницаемой боковой поверхностью..... 18
Зехцер В.О., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Агапов А.А. Метод синтеза нелинейных квазиоптимальных законов управления многомерными системами на основе условия максимума функции обобщенной мощности и анализа пучка квадратичных форм 34
Сумбатьян М.А., Закарян Р.М. Зарождение вихреобразования на границе кругового цилиндра при его обтекании потоком вязкой жидкости..... 43
Щербачков М.Е., Калайдин Е.Н. Высота микро- и нанокapли в модели, учитывающей толщину поверхностного слоя капли 55

Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On the Resonances of Academician I.I. Vorovich in Contact Problems with Deformable Stamp in Seismology..... 4
Beshtokov M.Kh. Difference Scheme of Higher Order of Approximation for the Aller's Equation with Variable Coefficients 13
Zhukov M.Yu., Tsyvenkova O.A. Stationary Rotationally Symmetric Convection During Isotachophoresis in a Circular Cylindrical Region with a Non-Deformable Free Impermeable Side Surface 18
Zekhtser V.O., Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Agapov A.A. Synthesis Method of Nonlinear Quasi-Optimal Control Laws for Multidimensional Systems Based on the Maximum Condition of the Generalized Power Function and the Analysis of a Beam of Quadratic Forms 34
Sumbatyan M.A., Zakaryan R.M. Origin of Vortex Formation at the Boundary of a Circular Cylinder in a Flow of Viscous Fluid 43
Shcherbakov M.E., Kalaydin E.N. The Height of the Micro and Nano Droplets in the Model Taking into Account the Thickness of the Surface Layer of the Droplet 55

<i>Аджиева А.А., Куповых Г.В., Керефова З.М.</i> Результаты анализа грозовой деятельности на территории Республики Северная Осетия – Алания.....	61	<i>Adzhieva A.A., Kupovykh G.V., Kerefova Z.M.</i> Results of the Analysis of Thunderstorm Activity on the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania.....	61
<i>Гацаева Л.С.</i> Геоэкологические проблемы излива термальных вод скважины 9-Т Каргалинская.....	70	<i>Gatsaeva L.S.</i> Geoecological Problems of the Outflow Thermal Water Wells 9-T Kargalinskaya	70
<i>Гибков Е.В., Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Решетняк В.Н.</i> Техногенные шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на микроэлементный состав речных вод и донных отложений	79	<i>Gibkov E.V., Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak V.N.</i> Technogenic Mine Waters of Eastern Donbass and Their Influence on the Microelement Composition of River Waters and Bottom Sediments	79
<i>Каранин А.В., Кочеева Н.А., Беликова М.Ю., Какорин В.А.</i> Энергия и суточный ход молниевой активности в локациях пожаров от гроз на территории Республики Алтай.....	91	<i>Karanin A.V., Kocheeva N.A., Belikova M.Yu., Kakorin V.A.</i> Energy and Diurnal Rate of Thunderstorm Activity in the Lightning Initiated Wildfire Locations on the Altai Republic Territory	91
<i>Лиев К.Б., Кущев С.А.</i> Градовые процессы различных типов в центральной части Северного Кавказа.....	103	<i>Liev K.B., Kushchev S.A.</i> Hail Processes of Various Types in the Central Part of the North Caucasus	103
<i>Максимова Н.Б., Морковкин Г.Г., Ненашева Г.И.</i> Динамика сроков наступления вегетационного периода по природно-почвенным зонам Алтайского края за 1955–2020 годы.....	110	<i>Maximova N.B., Morkovkin G.G., Nenasheva G.I.</i> Onset Dynamics of the Growing Season of Natural-Soil Zones of Altai Region for 1955-2020	110
<i>Мирзоева Н.Ю., Соловьёва О.В., Дорошенко Ю.В., Тихонова Е.А., Бурдиян Н.В.</i> Оценка качества воды и донных отложений Северо-Крымского канала перед запуском основного потока воды по содержанию углеводородов и некоторым микробиологическим показателям (весна 2022 г., полуостров Крым).....	118	<i>Mirzoeva N.Yu., Soloveva O.V., Doroshenko Yu.V., Tikhonova E.A., Burdiyan N.V.</i> Assessment of Water Quality and Bottom Sediments of the North Crimean Canal Before the Launch of the Main Flow of Water by the Content of Hydrocarbons and Some Microbiological Indicators (Spring 2022, Crimean Peninsula).....	118
<i>Сальник Н.В., Иволгина В.А., Горбов С.Н., Козырев Д.А.</i> Распределение тяжелых металлов и их миграция в системе почва – растение на примере парка Н. Островского города Ростова-на-Дону	126	<i>Salnik N.V., Ivolgina V.A., Gorbov S.N., Kozyrev D.A.</i> Distribution of Heavy Metals and Migration in the Soil-Plant System on the Example of N. Ostrovsky Park in Rostov-on-Don.....	126
<i>Сытник Н.А.</i> Влияние опасных гидрометеорологических явлений на эксплуатацию транспортного перехода через Керченский пролив	137	<i>Sytnik N.A.</i> Influence of Hazardous Hydrometeorological Phenomena on the Operation of Transport Crossing Through the Kerch Strait.....	137
<i>Хлопкова М.В., Бархалов Р.М., Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш.</i> Чужеродные моллюски в прибрежной части дагестанского района Каспийского моря	149	<i>Khlopkova M.V., Barkhalov R.M., Guseynov K.M., Gasanova A.Sh.</i> Alien Mollusks in the Coastal Part of the Dagestan Region of the Caspian Sea.....	140

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Цепина Н.И., Казеев К.Ш.</i> Влияние загрязнения таллием на активность ферментов циклов углерода, азота и фосфора в почвах разной буферности	156	<i>Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Tsepina N.I., Kazeev K.Sh.</i> The Effect of Thallium Pollution on the Activity of Enzymes of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Cycles in Soils of Different Buffering.....	156
--	-----	--	-----

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

<i>Бабешко В.А., Ворович Л.С., Гетман И.П., Ерусалимский Я.М., Карякин М.И., Кусраев А.Г.</i> Александр Ованесович Ватулян (70 лет со дня рождения)	164	<i>Babeshko V.A., Vorovich L.S., Getman I.P., Erusalimsky Ya.M., Karyakin M.I., Kusraev A.G.</i> Alexander Ovanesovich Vatulyan (70th Birthday).....	164
---	-----	--	-----

Указатель материалов, опубликованных в журнале «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2023 г.	167	Index of Articles Published in the Journal “Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science” in 2023.....	167
---	-----	---	-----

СЛОВО ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА: О ЮБИЛЕЕ

THE WORD OF THE EDITOR-IN-CHIEF: ABOUT THE ANNIVERSARY



Дорогие друзья!

Наш научный журнал уже более полувека радуется своими выпусками профессоров, преподавателей, докторантов, аспирантов, студентов, сотрудников институтов, промышленных предприятий и просто интересующихся наукой. С момента учреждения журнала в 1972 г. (первый номер вышел в 1973 г.) его главной задачей было освещение достижений фундаментальных и прикладных исследований в области общественных, естественных и технических наук. Основные научные направления и тематика исследований впервые на страницах трёх серий журнала были соотнесены с общей картиной развития науки в стране и экономики Северного Кавказа.

За 50 лет существования журнал прошел большой и трудный путь. Особенно непросто было в 90-е гг., потребовалось немало усилий, чтобы пре-

одолеть вызовы времени. Изменились направления деятельности журнала, периодичность и даже название (первоначальное – Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы (Известия СКНЦ ВШ), сменилось на нынешнее в 1995 г.), при перерегистрации издания пришлось также изменить число и состав учредителей. Но журнал выстоял. Поддержали нас Министерство образования, вузы Северного Кавказа, Южный федеральный университет (бывший Ростовский государственный университет), Южно-Российский государственный технический университет им. М.И. Платова (Новочеркасск) и многие другие. На страницах нашего издания по-прежнему обсуждаются и публикуются исследования на самые актуальные темы, охватывающие широкий спектр проблем современной науки. Авторы статей и материалов представляют не только Северный Кавказ, но и Москву, Санкт-Петербург, Крым, Урал, Алтай, Дальний Восток, ближнее и дальнее зарубежье. Учёные не избегают обсуждения злободневных вопросов в области науки и вузовского образования. Традиция чуткого отношения к авторам и их трудам, заложенная ещё Ю.А. Ждановым, сохраняется до сих пор. Как и 50 лет назад, мы открыты для широкого научного сотрудничества и дискуссий по различным проблемам.

Редакционную коллегию журнала всегда возглавляли уважаемые и обладавшие большим авторитетом ученые. Отдадим должное создателю и первому главному редактору,

член-корреспонденту РАН Юрию Андреевичу Жданову (1972–2006), а также его последователям на этом поприще профессору Александру Владимировичу Белоконю (2006–2013), академику РАН Владимиру Ивановичу Колесникову (2014–2019).

Как и все предыдущие годы, стратегия развития журнала сегодня направлена на совершенствование редакционной политики, повышение профессиональных стандартов и качества публикаций, интеграцию в международное научно-образовательное пространство в соответствии с международными стандартами и требованиями. Наш журнал включён в Перечень изданий, рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание учёной степени кандидата и доктора наук. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), «Киберленинка», «Рукопт», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», Ulrich, EBSCO.

На протяжении многих лет члены редакционной коллегии добросовестно и совершенно бескорыстно участвуют в нашей жизни. Их имена вы можете увидеть на обложке, но хочется выразить признание и особо отметить деятельность руководителей серии И.И. Воровича (1973–2001), А.В. Белоконя (2001–2013), нынешнего главы редколлегии В.Е. Закруткина, заместителей главного редактора О.Д. Пряхиной (1997–2001), Е.Г. Гежи (2001–2015), ответственного секретаря Н.И. Безверхой (1993–2001), членов редколлегии А.В. Абанина, Я.М. Ерусалимского, М.И. Карякина, С.И. Колесникова, Г.В. Куповых, В.А. Миноранского, Ю.А. Федорова, рецензентов и постоянных авторов О.Г. Авсянкина, Л.А. Беспаловой, А.О. Ватульяна, Т.М. Минкиной, Г.В. Муратовой, А.В. Поляковой, М.А. Сумбатяна, М.И. Чебакова и многих других.

Огромное спасибо и сотрудникам редакции, благодаря труду которых и поддерживается высокая издательская культура журнала. Это ответственные секретари Т.А. Ватульян, Е.А. Шинкаренко, редакторы отделов Л.С. Ворович, В.И. Литвиненко, Е.А. Колосова, О.В. Назаренко, программисты М.С. Шипитко, Н.Г. Шатравкина и другие.

Поздравляю авторов, читателей и почитателей журнала, членов редколлегии, рецензентов, сотрудников редакции и всех, кто причастен к деятельности нашего издания, со знаменательной датой – 50-летием журнала! Желаю всем благополучия, успешного покорения академических вершин, удачи во всех начинаниях, а журналу – развития и процветания на благо российской науки!

***Главный редактор журнала
Боровская Марина Александровна,
президент ЮФУ, член-корреспондент РАО,
председатель Совета ректоров вузов Юга России***

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-4-12

О РЕЗОНАНСАХ АКАДЕМИКА И.И. ВОРОВИЧА В КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧАХ С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ШТАМПОМ В СЕЙСМОЛОГИИ

Владимир Андреевич Бабешко^{1✉}, Ольга Владимировна Евдокимова², Ольга Мефодиевна Бабешко³

^{1, 2, 3} Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

¹babeshko41@mail.ru✉

²evdokimova.olga@mail.ru

³babeshko49@mail.ru

Аннотация. В работе впервые в комплексе излагаются методы получения резонансных частот в плоских и пространственных контактных задачах для деформируемых штампов.

Их существование предсказано академиком И.И. Воровичем. Им были построены одномерные модели деформируемых штампов, состоящие из жесткого штампа и пружины, иллюстрирующие возникновение резонансов. В настоящее время благодаря применению методов блочного элемента оказалось возможным исследовать реальные контактные задачи с деформируемым штампом. Ранее в работах авторов было установлено существование нового типа землетрясений, названных стартовыми. В процессе исследования оставались невычисленными некоторые функционалы, роль которых не была понятна.

Показано, что они служат построению дисперсионных кривых, дающих резонансные частоты, предсказанные академиком И.И. Воровичем. Исследован ряд разных типов контактных задач. Показано, как усложняется метод построения дисперсионных уравнений в связи с усложнением формы и реологий деформируемых штампов. Рассмотрены полубесконечный и в форме четверти плоскости деформируемые штампы простой реологии, анализируется полубесконечный штамп с реологией пластин Кирхгофа.

Полученные результаты дают ответ на один из способов построения дисперсионных уравнений для резонансов И.И. Воровича в контактных задачах для разных деформируемых штампов. Исследование тесно связано с выявлением новых предвестников сейсмичности и с решением некоторых проблем в теории прочности.

Ключевые слова: контактная задача, блочный элемент, деформируемый штамп, резонансы, литосферные плиты

Для цитирования: Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. О резонансах академика И.И. Воровича в контактных задачах с деформируемым штампом в сейсмологии // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 4–12.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/6.

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

Original article

ON THE RESONANCES OF ACADEMICIAN I.I. VOROVICH IN CONTACT PROBLEMS WITH DEFORMABLE STAMP IN SEISMOLOGY

Vladimir A. Babeshko^{1✉}, Olga V. Evdokimova², Olga M. Babeshko³

^{1, 2, 3} Kuban State University, Krasnodar, Russia

¹babeshko41@mail.ru✉

²evdokimova.olga@mail.ru

³babeshko49@mail.ru

Abstract. In this paper, for the first time, methods for obtaining resonant frequencies in plane and spatial contact problems for deformable stamps are presented in a complex.

Their existence was predicted by academician I.I. Vorovich. He constructed one-dimensional models of deformable stamps consisting of a rigid stamp and a spring, illustrating the occurrence of resonances. Currently, thanks to the use of block element methods, it has become possible to investigate real contact problems with a deformable stamp. Earlier in the works of the authors, the existence of a new type of earthquakes, called starting, was established. In the course of the study, some functionals remained uncomputed, the role of which was not clear.

It is shown that they serve to construct dispersion curves giving resonant frequencies predicted by academician I.I. Vorovich. A study is carried out for different types of contact problems and shows how the method of constructing dispersion equations becomes more complicated, both due to the complication of the shape of stamps and the complication of the rheologies of deformable stamps. Semi-infinite and deformable stamps of simple rheology in the form of a quarter plane are considered. In addition, a semi-infinite stamp with the rheology of Kirchhoff plates is analyzed.

The obtained results provide an answer to one of the methods of constructing dispersion equations for I.I. Vorovich resonances in contact problems for different deformable stamps. The study is closely related to the identification of new precursors of seismicity, as well as to solve some problems in the theory of strength.

Keywords: contact problem, block element, deformable stamp, resonances, lithospheric plates

For citation: Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On the Resonances of Academician I.I. Vorovich in Contact Problems with Deformable Stamp in Seismology. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):4-12. (In Russ.).

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation within the framework of scientific project No. MFI-20.1/6.

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

Введение

В основе исследования лежит ранее опубликованный авторами новый универсальный метод моделирования, применяемый в граничных задачах для систем дифференциальных уравнений в частных производных. Его достоинством является возможность ухода от необходимости решения сложных граничных задач для систем дифференциальных уравнений путем замены их на отдельные дифференциальные уравнения, среди которых самыми простыми являются уравнения Гельмгольца. С помощью комбинаций решений граничных задач для этого уравнения можно описывать поведение сложных решений многокомпонентных граничных задач, формируемых объектами на деформируемом основании. Контактные задачи с деформируемыми штампами приводятся к решению интегральных уравнений Винера – Хопфа. Рассмотрены три вида штампов: полубесконечный и в форме четверти плоскости, моделируемые уравнениями Гельмгольца, и полубесконечные, моделируемые реологией пластин Кирхгофа. Комбинацией таких объектов можно описывать решения контактной задачи для плоских деформируемых объектов более сложной реологии, а также для трехмерных. Наряду с доказательством построения точных решений рассматриваемых контактных задач отмечается появление в процессе выполнения исследования неизвестных функционалов. В задачах с абсолютно твердым штампом они не возникают. В работе найден способ их

определения и получено аналитическое их представление для случая полубесконечного штампа, а также соотношения, позволяющие строить дисперсионные уравнения резонансов И.И. Воровича. Обсуждаются особенности метода и полученных результатов.

Исследованиями в области контактных задач занимались и продолжают заниматься многие известные ученые в связи с их ролью в инженерной практике. Лишь небольшие примеры исследований в этой области приведены в публикациях [1–13]. Аналитические исследования контактных задач посвящены рассмотрению взаимодействий с абсолютно жестким штампом. В настоящей работе с применением нового, недавно разработанного авторами, метода проводится анализ особенностей взаимодействия деформируемого основания с деформируемым объектом в виде полуплоскости, четверти плоскости с простой реологией, а также с полубесконечным штампом с усложненной реологией, которую имеют пластины Кирхгофа. На примере этих задач оказывается возможным дополнить исследования нового типа землетрясений, названных стартовыми [14, 15], еще одним предвестником сейсмичности, следующим из учета деформируемости плит Кирхгофа как штампов. Они в соответствии с работами И.И. Воровича [16, 17] дополняются возможными резонансными явлениями, возникающими в литосферных плитах.

Постановка задачи

Рассматриваются на многослойной среде конечной толщины динамические контактные задачи, плоская и пространственная, о колебании с частотой ω деформируемых штампов. В случае плоской контактной задачи, обозначаемой A , на верхней границе вводится декартова система координат таким образом, что ось ox_3 направлена по внешней нормали, оси ox_1, ox_2 лежат в касательной плоскости. Предполагается, что в области $\Omega_1 (0 \leq x_1 \leq \infty, |x_2| \leq \infty)$ действует деформируемый штамп, описываемый уравнением Гельмгольца. В случае пространственной задачи, обозначаемой B , деформируемый штамп действует в области $\Omega_2 (0 \leq x_1 \leq \infty, 0 \leq x_2 \leq \infty)$.

Предполагается, что в зоне контакта действуют штампы без трения, т.е. присутствуют только нормальные напряжения. Вне штампа напряжения отсутствуют. Методом, описанным в [18], задачи A и B сводятся к решению интегральных уравнений вида

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) q(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f(x_1, x_2), \quad 0 \leq x_1 \leq \infty, |x_2| \leq \infty,$$

$$k(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)} d\alpha_1 d\alpha_2 \quad (A), \quad (1)$$

$$\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) q(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = f(x_1, x_2), \quad 0 \leq x_1 \leq \infty, 0 \leq x_2 \leq \infty \quad (B). \quad (2)$$

Здесь $q(x_1, x_2)$ – контактные напряжения под штампом; $f(x_1, x_2)$ – перемещения в зоне контакта; $k(x_1, x_2)$ – ядро интегрального уравнения; $K(\alpha_1, \alpha_2)$ – преобразование Фурье ядра интегрального уравнения. Задача состоит в рассмотрении случая деформируемого штампа.

Разработанный авторами подход [19] открыл возможность использовать фракталы (упакованные блочные элементы, являющиеся решениями достаточно простых граничных задач) при исследовании граничных задач для многокомпонентных сред.

Решения сложных граничных задач представляются в виде комбинации фракталов. С учетом этой возможности, в качестве деформируемого штампа принимаются фракталы – решения граничных задач в рассматриваемых областях, являющиеся упакованными блочными элементами для уравнения Гельмгольца.

Таким образом, необходимо построить в областях Ω_1 и Ω_2 упакованные блочные элементы, которые будут рассматриваться как деформируемые штампы. Ниже рассматривается двумерное уравнение Гельмгольца в указанных областях:

$$[\partial^2 x_1 + \partial^2 x_2 + p^2] \varphi(x_1, x_2) = g(x_1, x_2), \quad p^2 = c\omega^2, \quad c = \text{const}. \quad (3)$$

В задаче A (1) обозначим $g(x_1, x_2) = q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2)$, в задаче B (2) положим $s(x_1, x_2) = q(x_1, x_2) - t(x_1, x_2)$. Здесь $\varphi(x_1, x_2)$ – вертикальное перемещение в зоне контакта;

$q(x_1, x_2)$ – контактные напряжения, действующие на объект снизу, их надо определить; $t(x_1, x_2)$ – заданные внешние воздействия сверху на объект. Граничные условия для задач A и B имеют вид

$$\varphi(x_1, x_2) = \varphi(0, x_2), \quad x_1 \rightarrow 0, \quad x_1, x_2 \in \Omega_1,$$

$$\varphi(x_1, x_2) = \varphi(0, x_2), \quad x_1 \rightarrow 0; \quad \varphi(x_1, x_2) = \varphi(x_1, 0), \quad x_2 \rightarrow 0, \quad x_1, x_2 \in \Omega_2.$$

Для обеих задач необходимо построить упакованные блочные элементы.

Построение упакованных блочных элементов

Способ их построения изложен во многих публикациях авторов, например в [18].

Поставленная двумерная граничная задача A (3) сводится к одномерной с вещественным параметром α_2 в результате применения преобразования Фурье по координате x_2 .

$$(\partial^2 x_1 + k^2)\varphi(x_1) = g(x_1), \quad g(x_1) = q(x_1) - t(x_1), \quad k^2 = p^2 - \alpha_2^2, \quad (4)$$

$$\varphi(x_1) = \varphi(x_1, \alpha_2), \quad g(x_1) = g(x_1, \alpha_2), \quad \varphi(x_1, \alpha_2) = \varphi(0), \quad x_1 \rightarrow 0, \quad x_1 \in \Omega_1.$$

Применив к (4) метод блочного элемента [19], получим представление для упакованных блочных элементов. В задаче A имеем внешнюю форму

$$\omega_A(\alpha_1) = i(\alpha_1 - k)\varphi_A(0) + G_A(k)0 - G_A(\alpha_1), \quad G_A(\alpha_1) = Q_A(\alpha_1) - T_A(\alpha_1), \quad \omega_A(k) = 0,$$

$$G_A(\alpha_1) = \int_0^\infty g_A(x_1)e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha, \quad Q_A(\alpha_1) = \int_0^\infty q_A(x_1)e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad T_A(\alpha_1) = \int_0^\infty t_A(x_1)e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1$$

и интегральное уравнение (1) в виде

$$\int_0^\infty k_0(x_1 - \xi_1)q(\xi_1)d\xi_1 = f(x_1), \quad q(\xi_1) = q(\xi_1, \alpha_2), \quad k_0(x_1) = k(x_1, \alpha_2),$$

$$k_0(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty K_0(\alpha_1)e^{-i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad K_0(\alpha_1) = K(\alpha_1, \alpha_2), \quad K_0(\alpha_1) = P_0^{-1}(\alpha_1)R_0(\alpha_1). \quad (5)$$

Ради краткости считаем, что функция $K_0(\alpha_1)$ является четной, мероморфной, на бесконечности обладает асимптотическим поведением $K_0(\alpha_1) = O(\alpha_1^{-1})$, $\text{Im}\alpha_1 = 0$. Такое свойство характерно для ядер интегральных уравнений, построенных для смешанных задач на многослойной среде [18].

Функция $K_0(\alpha_1)$ представляется отношением двух целых функций $R_0(\alpha_1)$ и $P_0(\alpha_1)$, имеющих счетные множества нулей, уходящих на бесконечность в окрестностях мнимых осей.

Примеры смешанных задач, в которых встречаются подобные интегральные уравнения, имеются в многочисленных публикациях, например в [18].

Граничная задача B для блочного элемента остается двумерной

$$[\partial^2 x_1 + \partial^2 x_2 + p^2]\varphi(x_1, x_2) = g(x_1, x_2), \quad x_1, x_2 \in \Omega_2,$$

$$\varphi(x_1, x_2) = \varphi(0, x_2), \quad x_1 \rightarrow 0; \quad \varphi(x_1, x_2) = \varphi(x_1, 0), \quad x_2 \rightarrow 0. \quad (6)$$

Внешняя форма для (6) представима в виде

$$\omega_A(\alpha_1) = i(\alpha_1 - k)\varphi_A(A) + G_A(k) - G_A(\alpha_1), \quad G_A(\alpha_1) = Q_A(\alpha_1) - T_A(\alpha_1), \quad \omega_A(k) = 0,$$

$$G_A(\alpha_1) = \int_0^\infty g_A(x_1)e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha, \quad Q_A(\alpha_1) = \int_0^\infty q_A(x_1)e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1, \quad T_A(\alpha_1) = \int_0^\infty t_A(x_1)e^{i\alpha_1 x_1} d\alpha_1.$$

Вертикальные перемещения от блочных элементов в задаче A (5) имеют вид

$$\varphi_A(x_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{\omega_A(\alpha)}{\alpha^2 - k^2} e^{-i\alpha x_1} d\alpha. \quad (7)$$

Для задачи B (6) упакованный блочный элемент в четверти плоскости имеет представление

$$\varphi_B(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\gamma_1} \int_{\gamma_2} \frac{\omega_B(\alpha_1, \alpha_2) d\alpha_1 d\alpha_2}{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - p^2)}. \quad (8)$$

После его применения к рассматриваемой граничной задаче получаем внешнюю форму в преобразовании Фурье в виде

$$\omega_B(\alpha_1, \alpha_2) = \left[\frac{\alpha_1}{\alpha_{1+}} - 1 \right] \langle \Psi_1(0, \alpha_2) - \Psi_1(0, \alpha_{2+}) \rangle + \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_{2+}} - 1 \right] \langle \Psi_2(\alpha_1, 0) - \Psi_2(\alpha_{1+}, 0) \rangle + S(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{1+}, \alpha_{2+}).$$

Здесь принято обозначение:

$$S(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{1+}, \alpha_{2+}) = -Q(\alpha_1, \alpha_2) - \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_{1+} \alpha_{2+}} Q(\alpha_{1+}, \alpha_{2+}) + \frac{\alpha_1}{\alpha_{1+}} Q(\alpha_{1+}, \alpha_2) + \frac{\alpha_2}{\alpha_{2+}} Q(\alpha_1, \alpha_{2+}) + T(\alpha_1, \alpha_2) + \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_{1+} \alpha_{2+}} T(\alpha_{1+}, \alpha_{2+}) - \frac{\alpha_1}{\alpha_{1+}} T(\alpha_{1+}, \alpha_2) - \frac{\alpha_2}{\alpha_{2+}} T(\alpha_1, \alpha_{2+}),$$

$$\alpha_{1+} = i\sqrt{\alpha_2^2 - p^2}, \quad \alpha_{2+} = i\sqrt{\alpha_1^2 - p^2}, \quad \operatorname{Re}\sqrt{\alpha_m^2 - p^2} > 0, \quad v = 1, 2.$$

В дальнейшем, если не будет оговорено отдельно, прописными буквами будем обозначать преобразование Фурье от функций, обозначенных строчными буквами, например $Q(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} q(x) e^{i\alpha x} dx$.

Первые четыре члена справа у функции $S(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{1+}, \alpha_{2+})$ представляют преобразования Фурье неизвестного контактного напряжения $Q(\alpha_1, \alpha_2)$ и неизвестные функционалы $Q(\alpha_{1+}, \alpha_{2+})$, $Q(\alpha_{1+}, \alpha_2)$, $Q(\alpha_1, \alpha_{2+})$ от искомого контактного напряжения. Остальные члены справа представляют преобразования Фурье и функционалы от задаваемых внешних воздействий. По опыту исследования одномерной контактной задачи [20] вначале должны быть определены контактные напряжения под деформируемым штампом, после – функционалы.

Построение функциональных уравнений

Для приведения смешанной граничной задачи к интегральному уравнению приравняем перемещения (3) $f_A(x_1), f_B(x_1, x_2)$ в зоне контакта, составленные для многослойного основания, и перемещения упакованного блочного элемента (5) $\varphi_A(x_1), \varphi_B(x_1, x_2)$ в обеих задачах соответственно, предварительно применив к ним преобразование Фурье. Для задачи A получаем соотношение [20]:

$$K_0(\alpha_1) Q_A(\alpha_1) + E_A(\alpha_1) = -(\alpha_1^2 - k^2)^{-1} Q_A(\alpha_1) + S_A(\alpha_1), \quad (9)$$

$$S_A(\alpha_1) = (\alpha_1^2 - k^2)^{-1} \langle i(\alpha_1 - k) \varphi_A(A) e^{i\alpha_1 A} + T_A(\alpha_1) - T_A(k) e^{i(\alpha_1 - k)A} + Q_A(k) e^{i(\alpha_1 - k)A} \rangle.$$

Аналогично в случае задачи B . Используя (2), (6)–(8), имеем [21]

$$M(\alpha_1, \alpha_2) Q(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{Q_1(\alpha_1, \alpha_2) + G(\alpha_1, \alpha_2)}{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - p^2)},$$

$$M(\alpha_1, \alpha_2) = K(\alpha_1, \alpha_2) + \frac{1}{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - p^2)}, \quad \omega(\alpha_1, \alpha_2) = -Q(\alpha_1, \alpha_2) + Q_1(\alpha_1, \alpha_2) + G(\alpha_1, \alpha_2),$$

$$Q_1(\alpha_1, \alpha_2) = -\frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_{1+} \alpha_{2+}} Q(\alpha_{1+}, \alpha_{2+}) + \frac{\alpha_1}{\alpha_{1+}} Q(\alpha_{1+}, \alpha_2) + \frac{\alpha_2}{\alpha_{2+}} Q(\alpha_1, \alpha_{2+}),$$

$$G(\alpha_1, \alpha_2) = T(\alpha_1, \alpha_2) + \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_{1+} \alpha_{2+}} T(\alpha_{1+}, \alpha_{2+}) - \frac{\alpha_1}{\alpha_{1+}} T(\alpha_{1+}, \alpha_2) - \frac{\alpha_2}{\alpha_{2+}} T(\alpha_1, \alpha_{2+}) + \left[\frac{\alpha_1}{\alpha_{1+}} - 1 \right] \langle \Psi_1(0, \alpha_2) - \Psi_1(0, \alpha_{2+}) \rangle + \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_{2+}} - 1 \right] \langle \Psi_2(\alpha_1, 0) - \Psi_2(\alpha_{1+}, 0) \rangle. \quad (10)$$

Опуская выкладки, подробно изложенные в [20], получим решения построенных функциональных уравнений.

Решение функционального уравнения (9) задачи A с неизвестными функционалами в правых частях, выполненное в преобразовании Фурье, имеет вид [20]

$$Q_A(\alpha_1) = Q_A(k)N_1(\alpha_1) + N_2(\alpha_1), \quad Q_A(\alpha_1) \equiv Q_A^+(\alpha_1),$$

$$N_1(\alpha_1) = P_{0+}(\alpha_1)(\alpha_1 + k)R^{-1}_+(\alpha_1)\{P_{0-}(\alpha_1)R^{-1}_-(\alpha_1)(\alpha_1 + k)^{-1}\}^+,$$

$$N_2(\alpha_1) = P_{0+}(\alpha_1)(\alpha_1 + k)R^{-1}_+(\alpha_1)\{P_{0-}(\alpha_1)(\alpha_1 - k)R^{-1}_-(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}\langle i(\alpha_1 - k)\varphi_A(0) + T_A(\alpha_1) - T_A(k) \rangle\}^+.$$

Из последнего соотношения при $\alpha_1 = k$ находится искомым функционал.

$$Q_A(k) = [1 - N_1(k)]^{-1}N_2(k), \quad N_1(k) = 2kP_{0+}(k)R^{-1}_+(k)\{P_{0-}(\alpha_1)R^{-1}_-(\alpha_1)(\alpha_1 + k)^{-1}\}_k^+,$$

$$N_2(k) = 2kP_{0+}(k)kR^{-1}_+(k)\{P_{0-}(\alpha_1)(\alpha_1 - k)R^{-1}_-(\alpha_1)(\alpha_1^2 - k^2)^{-1}\langle i(\alpha_1 - k)\varphi_A(0) + T_A(\alpha_1) - T_A(k) \rangle\}_k^+.$$

Окончательно решение принимает вид $Q_A(\alpha_1) = [1 - N_1(k)]^{-1}N_2(k)N_1(\alpha_1) + N_2(\alpha_1)$.

Здесь $\{R(\alpha_1)\}_k^+$ означает, что берется $\alpha_1 = k$ после вычисления интеграла (9).

Из этого соотношения видно, что решение может стать неограниченным, если имеет место условие $1 - N_1(k) = 0$. Оно определяет резонансные частоты, предсказанные академиком И.И. Воровичем, и является дисперсионным для этого типа контактных задач. Таким образом, для контактных задач типа A дисперсионное уравнение получается в явном виде.

Решение функционального уравнения (10) задачи B с неизвестными функционалами в правых частях, выполненное в преобразовании Фурье, имеет вид

$$Q(\alpha_1, \alpha_2) = \int_{\gamma_3} \int_{\gamma_4} \left[\frac{-\frac{\alpha_1\alpha_2}{\alpha_{1+}\alpha_{2+}}Q(\alpha_{1+}, \alpha_{2+}) + \frac{\eta_1}{\alpha_{1+}}Q(\alpha_{1+}, \eta_2) + \frac{\eta_2}{\alpha_{2+}}Q(\eta_1, \alpha_{2+})}{(\eta_1 - \alpha_1)(\eta_2 - \alpha_2)[R(u)(\eta_1^2 + \eta_2^2 - k^2) + P(u)]} P(u) \right. \\
 + \frac{G(\alpha_1, \alpha_2)P(u)}{R(u)[(\alpha_1^2 - k^2) + (\alpha_2^2 - k^2)] + P(u)} + i2\pi \int_{\gamma_3} \int_{\gamma_4} \frac{M_{+1}(\eta_1, \alpha_2)}{M_{+1}(\alpha_1, \alpha_2)(\eta_1 - \alpha_1)} \frac{A(\eta_1, \eta_2)_1}{M(\eta_1, \eta_2)} d\eta_1 d\eta_2 + \\
 \left. + i2\pi \int_{\gamma_3} \int_{\gamma_4} \frac{M_{+2}(\alpha_1, \eta_2)}{M_{+2}(\alpha_1, \alpha_2)(\eta_2 - \alpha_2)} \frac{A(\eta_1, \eta_2)}{M(\eta_1, \eta_2)} d\eta_1 d\eta_2 \right]. \quad (11)$$

Выражения, входящие в эти формулы, достаточно сложные. Они представлены в [21].

Важно отметить, что входящие в это представление неизвестные функционалы зависят также от одного из параметров преобразования Фурье. Поэтому для их определения в соответствии с вышеприведенным случаем задачи A предстоит решать одномерные интегральные уравнения, полученные из подстановки аргументов функционалов α_{1+}, α_{2+} в соотношение (11). Для приближенного вычисления эти уравнения принимают вид

$$Q(\alpha_{1+}, \alpha_2) = \int_{\gamma_3} \int_{\gamma_4} \frac{A(\eta_1, \eta_2)d\eta_1 d\eta_2}{M(\eta_1, \eta_2)(\eta_1 - \alpha_{1+})(\eta_2 - \alpha_2)} + \frac{i2\pi A_1(\alpha_{1+})}{M_{+1}(\alpha_{1+}, \alpha_2)} + \frac{i2\pi A_2(\alpha_2)}{M_{+2}(\alpha_{1+}, \alpha_2)} + G_1(\alpha_{1+}, \alpha_2),$$

$$Q(\alpha_1, \alpha_{2+}) = \int_{\gamma_3} \int_{\gamma_4} \frac{A(\eta_1, \eta_2)d\eta_1 d\eta_2}{M(\eta_1, \eta_2)(\eta_1 - \alpha_1)(\eta_2 - \alpha_{2+})} + \frac{i2\pi A_1(\alpha_1)}{M_{+1}(\alpha_1, \alpha_{2+})} + \frac{i2\pi A_2(\alpha_{2+})}{M_{+2}(\alpha_1, \alpha_{2+})} + G_1(\alpha_1, \alpha_{2+}),$$

$$Q(\alpha_{1+}, \alpha_{2+}) = \int_{\gamma_3} \int_{\gamma_4} \frac{A(\eta_1, \eta_2)d\eta_1 d\eta_2}{M(\eta_1, \eta_2)(\eta_1 - \alpha_{1+})(\eta_2 - \alpha_{2+})} + \frac{i2\pi A_1(\alpha_{1+})}{M_{+1}(\alpha_{1+}, \alpha_{2+})} + \frac{i2\pi A_2(\alpha_{2+})}{M_{+2}(\alpha_{1+}, \alpha_{2+})} + G_1(\alpha_{1+}, \alpha_{2+}).$$

Здесь приняты обозначения:

$$G_1(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{G(\alpha_1, \alpha_2)}{R(u)[(\eta_1^2 + \eta_2^2 - p^2)] + P(u)}, \quad \frac{A(\alpha_1, \alpha_2)}{M(\alpha_1, \alpha_2)} = Q_1(\alpha_1, \alpha_2)B(\alpha_1, \alpha_2) + G_1(\alpha_1, \alpha_2),$$

$$A_1(\alpha_1) = \int_{\gamma_3} \int_{\gamma_4} \frac{M_{+1}(\eta_1, \alpha_2)}{(\eta_1 - \alpha_1)} \frac{A(\eta_1, \eta_2)}{M(\eta_1, \eta_2)} d\eta_1 d\eta_2, \quad A_2(\alpha_2) = \int_{\gamma_3} \int_{\gamma_4} \frac{M_{+2}(\alpha_1, \eta_2)}{(\eta_2 - \alpha_2)} \frac{A(\eta_1, \eta_2)}{M(\eta_1, \eta_2)} d\eta_1 d\eta_2.$$

Таким образом, усложнение формы деформируемого штампа приводит и к усложнению построения дисперсионных уравнений соответствующей контактной задачи.

Случай литосферных плит в форме пластин Кирхгофа

В работе [14] было обнаружено существование нового типа землетрясений, названных стартовыми. Ниже покажем, что построенные в ней функциональные уравнения, наряду с обнаружением стартовых землетрясений, также несут в себе и соотношения для обнаружения резонансов академика И.И. Воровича. Обращаясь к статье [14], выпишем функциональное уравнение граничной задачи о приближающихся торцами литосферных плитах, моделируемых пластинами Кирхгофа. Оно имеет вид

$$\left[\varepsilon_{53r} (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} + \varepsilon_6^{-1} K_1(\alpha_1, \alpha_2) \right] G^+(\alpha_1, \alpha_2) = - \left[\varepsilon_{53\lambda} (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} + \varepsilon_6^{-1} K_1(\alpha_1, \alpha_2) \right] G^-(\alpha_1, \alpha_2) + U_{3\theta}(\alpha_1, \alpha_2) + (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{-2} \left[A_\lambda k_{1\lambda} + B_\lambda k_{2\lambda} + A_r k_{1r} + B_r k_{2r} + \varepsilon_{53\lambda} T^+(\alpha_1, \alpha_2) + \varepsilon_{53r} T^-(\alpha_1, \alpha_2) \right], \quad \theta > 0.$$

Построенные решения функционального уравнения под каждой плитой представимы в виде [14]

$$G_+(\alpha_1, \alpha_2) = C_{1+}(\alpha_1, \alpha_2) G_+(\alpha_1, \alpha_{2+}) + C_{2+}(\alpha_1, \alpha_2) G_-(\alpha_1, \alpha_{2-}) + C_{3+}(\alpha_1, \alpha_2) G'_+(\alpha_1, \alpha_{2+}) + C_{4+}(\alpha_1, \alpha_2) G'_-(\alpha_1, \alpha_{2-}) + C_{5+}(\alpha_1, \alpha_2),$$

$$G_-(\alpha_1, \alpha_2) = C_{1-}(\alpha_1, \alpha_2) G_+(\alpha_1, \alpha_{2+}) + C_{2-}(\alpha_1, \alpha_2) G_-(\alpha_1, \alpha_{2-}) + C_{1-}(\alpha_1, \alpha_2) G'_+(\alpha_1, \alpha_{2+}) + C_{2-}(\alpha_1, \alpha_2) G'_-(\alpha_1, \alpha_{2-}) + C_{3-}(\alpha_1, \alpha_2).$$

Здесь неизвестными являются функционалы не только от контактных напряжений $G_+(\alpha_1, \alpha_{2-})$, $G_-(\alpha_1, \alpha_{2-})$, но также и от производных по параметру факторизации $G'_+(\alpha_1, \alpha_{2+})$. Для их определения положим в первом уравнении и в продифференцированном $\alpha_1 = \alpha_{2+}$, а во втором и продифференцированном уравнении $-\alpha_2 = \alpha_{2-}$. Получаем алгебраическую систему для определения всех вышеперечисленных четырех неизвестных.

Определитель $\Delta(\alpha_1, \alpha_2, \omega)$ этой системы четырех линейных алгебраических уравнений позволяет получить дисперсионное уравнение для определения дискретных резонансов академика И.И. Воровича в этой сложной задаче.

Поскольку в процессе решения системы линейных алгебраических уравнений знаменателем в решениях является определитель, дисперсионное уравнение имеет вид $\Delta(\alpha_1, \alpha_2, \omega) = 0$.

Выводы

Исследование, выполненное в настоящей работе, определило метод построения дисперсионных уравнений, служащих для нахождения резонансных значений в контактных задачах с деформируемыми штампами. Для деформируемых штампов в случае их полубесконечных или полосовых форм дисперсионное уравнение получается из решения линейной алгебраической системы уравнений. В случае более сложной пространственной формы, например четверти плоскости, оно получается в результате решения линейного интегрального уравнения.

Список источников

1. Papangelo A., Ciavarella M., Barber J.R. Fracture Mechanics implications for apparent static friction coefficient in contact problems involving slip-weakening laws // Proc. Roy. Soc. (London): A 2. 2015. Iss. 2180. Article Number: 20150271.
2. Zhou S., Gao X.L. Solutions of half-space and half-plane contact problems based on surface elasticity // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. 2013. Vol. 64. S. 145–166.
3. Almqvist A. A solution of the linear elastic contact mechanics problem. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/43216> (дата обращения: 10.02.2013).
4. Cocou M. A class of dynamic contact problems with Coulomb friction in viscoelasticity // Nonlinear Analysis: Real World Applications. 2015. Vol. 22. P. 508–519.
5. Ciavarella M. The generalized Cattaneo partial slip plane contact problem. I - Theory, II - Examples // Int. J. Solids Struct. 1998. Vol. 35. P. 2349–2378.
6. Guler M.A., Erdogan F. The frictional sliding contact problems of rigid parabolic and cylindrical stamps on graded coatings // Int. J. Mech. Sci. 2007. Vol. 49. P. 161–182.
7. Ke L.-L., Wang Y.-S. Two-Dimensional Sliding Frictional Contact of Functionally Graded Materials // Eur. J. Mech. A/Solids. 2007. Vol. 26. P. 171–188.

8. Almqvist A., Sahlin F., Larsson R., Glavatskih S. On the dry elasto-plastic contact of nominally flat surfaces // *Tribology International*. 2007. Vol. 40 (4). P. 574–579.
9. Andersson L.E. Existence results for quasistatic contact problems with Coulomb friction // *Appl. Math. Optim.* 2000. Vol. 42. P. 169–202.
10. Cocou M., Rocca R. Existence results for unilateral quasistatic contact problems with friction and adhesion // *Math. Modelling and Num. Analysis*. 2000. Vol. 34. P. 981–1001.
11. Kikuchi N., Oden J. *Contact Problems in Elasticity: A Study of Variational Inequalities and Finite Element Methods* // *SIAM Studies in Applied Mathematics*. SIAM, Philadelphia, 1988.
12. Raous M., Cangermi L., Cocou M. A consistent model coupling adhesion, friction, and unilateral contact // *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.* 1999. Vol. 177. P. 383–399.
13. Shillor M., Sofonea M., Telega J.J. *Models and Analysis of Quasistatic Contact*. Lect. Notes Phys. 655. Berlin; Heidelberg: Springer, 2004.
14. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On the possibility of predicting some types of earthquake by a mechanical approach // *Acta Mechanica*. 2018. Vol. 229 (5). P. 2163–2175, <https://doi.org/10.1007/s00707-017-2092-0>.
15. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On a mechanical approach to the prediction of earthquakes during horizontal motion of lithospheric plates // *Acta Mechanica*. 2018. Vol. 229. P. 4727–4739, <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2255-7>.
16. Ворович И.И. Спектральные свойства краевой задачи теории упругости для неоднородной полосы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245, № 4. С. 817–820.
17. Ворович И.И. Резонансные свойства упругой неоднородной полосы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245, № 5. С. 1076–1079.
18. Ворович И.И., Бабешко В.А. *Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей*. М.: Наука, 1979. 320 с.
19. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Фрактальные свойства блочных элементов и новый универсальный метод моделирования // Докл. АН. 2021. Т. 499. С. 21–26. Doi: 9.31857/S2686740021040039.
20. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. О контактных задачах с деформируемым штампом // Проблемы прочности и пластичности. 2022. Т. 84, № 1. С. 25–34. Doi: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-25-34.
21. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Зарецкая М.В., Евдокимов В.С. О контактной задаче с деформируемым штампом в четверти плоскости // ПММ. 2023. Т. 87, № 2. С. 302–312. Doi: 10.31857/S0032823523020030, EDN: TYZHJI.

References

1. Papangelo A., Ciavarella M., Barber J. R. Fracture Mechanics implications for apparent static friction coefficient in contact problems involving slip-weakening laws. *Proc. Roy. Soc. (London): A* 2. 2015;(2180):20150271.
2. Zhou S., Gao X.L. Solutions of half-space and half-plane contact problems based on surface elasticity. *Zeitschrift fr angewandte Mathematik und Physik*. 2013;64:145-166.
3. Almqvist A. A solution of the linear elastic contact mechanics problem. Available from: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/43216> [Accessed 10th February 2013].
4. Cocou M. A class of dynamic contact problems with Coulomb friction in viscoelasticity. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 2015;22:508-519.
5. Ciavarella M. The generalized Cattaneo partial slip plane contact problem. I - Theory, II - Examples. *Int. J. Solids Struct.* 1998;35:2349-2378.
6. Guler M.A., Erdogan F. The frictional sliding contact problems of rigid parabolic and cylindrical stamps on graded coatings. *Int. J. Mech. Sci.* 2007;49:161-182.
7. Ke L.-L., Wang Y.-S. Two-Dimensional Sliding Frictional Contact of Functionally Graded Materials. *Eur. J. Mech. A/Solids*. 2007;26:171-188.
8. Almqvist A., Sahlin F., Larsson R., Glavatskih S. On the dry elasto-plastic contact of nominally flat surfaces. *Tribology International*. 2007;40(4):574-579.
9. Andersson L.E. Existence results for quasistatic contact problems with Coulomb friction. *Appl. Math. Optim.* 2000;42:169-202.
10. Cocou M., Rocca R. Existence results for unilateral quasistatic contact problems with friction and adhesion. *Math. Modelling and Num. Analysis*. 2000;34:981-1001.
11. Kikuchi N., Oden J. *Contact Problems in Elasticity: A Study of Variational Inequalities and Finite Element Methods*. *SIAM Studies in Applied Mathematics*. SIAM, Philadelphia, 1988.
12. Raous M., Sapdemi L., Cocou M. A consistent model coupling adhesion, friction, and unilateral contact. *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.* 1999;177:383-399.
13. Shillor M., Sofonea M., Telega J.J. *Models and Analysis of Quasistatic Contact*. Lect. Notes Phys. 655. Berlin; Heidelberg: Springer, 2004.

14. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On the possibility of predicting some types of earthquake by a mechanical approach. *Acta Mechanica*. 2018;229:2163-2175, <https://doi.org/10.1007/s00707-017-2092-0>.

15. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On a mechanical approach to the prediction of earthquakes during horizontal motion of lithospheric plates. *Acta Mechanica*. 2018;229:4727-4739, <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2255-7>.

16. Vorovich I.I. Spectral properties of the boundary value problem of elasticity theory for an inhomogeneous band. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1979;245(4):817-820. (In Russ.).

17. Vorovich I.I. Resonant properties of an elastic inhomogeneous band. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1979;245(5):1076-1079. (In Russ.).

18. Vorovich I.I., Babeshko V.A. *Dynamic mixed problems of elasticity theory for nonclassical domains*. Moscow: Nauka Publ.; 1979. 320 p. (In Russ.).

19. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Fractal properties of block elements and a new universal modeling method. *Doklady Physics*. 2021;66(8):218-222.

20. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. On contact problems with a deformable stamp. *Problemy prochnosti plastichnosti = Problems of Strength and Plasticity*. 2022;84(1):25-34, doi: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-25-34. (In Russ.).

21. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Zaretskaya M. V., Evdokimov V. S. On a contact problem with a deformable stamp in a quarter plane. *PMM = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2023;87(2):302-312, doi: 10.31857/S0032823523020030, EDN: TYZHJI. (In Russ.).

Информация об авторах

В.А. Бабешко – доктор физико-математических наук, профессор, академик, заведующий кафедрой математического моделирования.

О.В. Евдокимова – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник.

О.М. Бабешко – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник.

Information about the authors

V.A. Babeshko - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Academician, Head of the Department of Mathematical Modeling.

O.V. Evdokimova - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Main Researcher.

O.M. Babeshko - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Main Researcher.

*Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 24.06.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 08.06.2023; approved after reviewing 24.06.2023; accepted for publication 30.10.2023.*

Научная статья

УДК 519.63

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-13-17

РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ АЛЛЕРА С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Мурат Хамидбиевич Бештоков

*Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия
beshtokov-murat@yandex.ru*

Аннотация. Изучена начально-краевая задача для одномерного уравнения Аллера с переменными коэффициентами и граничными условиями первого рода. Исследуемая задача описывает процессы передачи тепла в гетерогенной среде, переноса влаги в почвогрунтах, фильтрации жидкости в трещиновато-пористых средах. Для её численного решения построена разностная схема высокого порядка точности – четвертого порядка точности по h и второго порядка точности по τ . 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 линейности рассматриваемой задачи из полученной априорной оценки следует сходимость решения построенной разностной задачи к решению исходной дифференциальной задачи со скоростью, равной порядку аппроксимации разностной схемы.

Цель и научная новизна работы – получение новой численной схемы повышенного порядка аппроксимации при решении задачи Дирихле для уравнения Аллера с переменными коэффициентами.

Ключевые слова: уравнение Аллера, задача Дирихле, разностные схемы, схемы повышенного порядка точности, априорная оценка в разностной форме, устойчивость и сходимость разностных схем

Для цитирования: 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.

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

Original article

DIFFERENCE SCHEME OF HIGHER ORDER OF APPROXIMATION FOR THE ALLER'S EQUATION WITH VARIABLE COEFFICIENTS

Murat Kh. Beshtokov

*Institute of Applied Mathematics and Automation, Kabardino-Balkarian Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia
beshtokov-murat@yandex.ru*

Abstract. The initial boundary value problem for the one-dimensional Aller's equation with variable coefficients and boundary conditions of the first kind is studied. The problem under study describes the processes of heat transfer in a heterogeneous environment, moisture transfer in soils, and fluid filtration in fractured porous media. To numerically solve the problem posed, a difference scheme of high order of accuracy was constructed - fourth order of accuracy in h and second order of accuracy in τ . Using the method of energy inequalities, an a priori estimate of the solution in a difference treatment is obtained. From this estimate it follows that the solution is unique and stable with respect to the right-hand side and initial data. Under the assumption of the existence of an exact solution to the original differential problem in the class of sufficiently smooth functions, and also due to

© Бештоков М.Х., 2023

the linearity of the problem under consideration, the obtained a priori estimate implies that the solution of the constructed difference problem converges to the solution of the original differential problem at a rate equal to the order of approximation of the difference scheme.

The goal and scientific novelty of the work is to obtain a new numerical scheme of a higher order of approximation when solving the Dirichlet problem for the Aller's equation with variable coefficients.

Keywords: Aller's equation, Dirichlet problem, difference schemes, schemes of higher order of accuracy, a priori estimate in difference form, stability and convergence of difference schemes

For citation: Beshtokov M.Kh. Difference Scheme of Higher Order of Approximation for the Aller's Equation with Variable Coefficients. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):13-17. (In Russ.).

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

Введение

Известно, что вопросы передачи тепла в гетерогенной среде [1], переноса влаги в почво-грунтах [2; 3, с. 137], фильтрации жидкости в трещиновато-пористых средах [4, 5] приводят к дифференциальному уравнению в частных производных гиперболического типа третьего порядка (уравнение Аллера).

Важной задачей вычислительной математики является построение и исследование разностных схем высокого порядка точности, аппроксимирующих уравнения математической физики. В последнее время для их построения используются компактно-разностные схемы повышенных порядков точности, записывающиеся на стандартных для данного уравнения шаблонах [6–8].

Цель и научная новизна работы – получение новой численной схемы повышенного порядка аппроксимации при решении задачи Дирихле для уравнения Аллера с переменными коэффициентами. Методом энергетических неравенств получена априорная оценка в разностной форме, из которой следуют единственность и устойчивость решения по правой части и начальным данным, а также сходимость решения разностной задачи к решению исходной дифференциальной задачи со скоростью $O(h^4 + \tau^2)$.

Исследованию краевых задач для различных уравнений Аллера посвящены работы [9–11].

Постановка задачи

В замкнутом прямоугольнике $\bar{Q}_T = \{(x, t): 0 \leq x \leq l, 0 \leq t \leq T\}$ рассмотрим следующую задачу:

$$\begin{cases} u_t = k(t) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} - q(x, t)u(x, t) + f(x, t), & 0 < x < l, 0 < t \leq T, \\ u(0, t) = u(l, t) = 0, & 0 \leq t \leq T, \\ u(x, 0) = u_0(x), & 0 \leq x \leq l, \end{cases} \quad (1)$$

где $0 < c_0 \leq k(t) \leq c_1$, $A = \text{const} > 0$, $|q(t)| \leq c_2$,

$$u(x, t) \in C^{6,3}(\bar{Q}_T), \quad k(t), q(t) \in C^1[0, T], \quad f(x, t) \in C^{2,1}(\bar{Q}_T). \quad (2)$$

Устойчивость и сходимость разностной схемы

Для решения задачи (1) применим метод конечных разностей. Для этого на равномерной сетке $\bar{\omega}_{h\tau} = \bar{\omega}_h \times \bar{\omega}_\tau$ дифференциальной задаче (1) поставим в соответствие разностную схему порядка аппроксимации $O(h^4 + \tau^2)$, где $\bar{\omega}_h = \{x_i = ih, i = \overline{0, N}, h = \frac{l}{N}\}$, $\bar{\omega}_\tau = \{t_j = j\tau, j = \overline{0, 1, \dots, j_0}; \tau = T/j_0\}$.

$$\mathcal{H}_h y_t = \frac{1}{2} a Y_{xx} + A y_{\bar{x}x t} - \frac{1}{2} d \mathcal{H}_h Y + \mathcal{H}_h \varphi, \quad (3)$$

$$Y_0^j = Y_N^j = 0, \quad j = \overline{0, 1, \dots, j_0}, \quad y(x_i, 0) = u_0(x_i), \quad i = \overline{0, 1, \dots, N}, \quad (4)$$

где $\mathcal{H}_h y_i^j = \frac{1}{12}(y_{i+1}^j + 10y_i^j + y_{i-1}^j) = y_i^j + \frac{h^2}{12}y_{\bar{x}x,i}^j$, $i = 1, \dots, N-1$,
 $y^{j+1} = (y^{j+1} + y^j)$, $a^j = k\left(t_{j+\frac{1}{2}}\right)$, $d^j = q\left(t_{j+\frac{1}{2}}\right)$, $\varphi_i^j = f\left(x_i, t_{j+\frac{1}{2}}\right)$.

Теорема 1. Пусть выполнены условия (2). Тогда существует такое τ_0 , что если $\tau \leq \tau_0$, то для решения разностной задачи (3), (4) справедлива априорная оценка
 $\|y^{j+1}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^{j+1}\|_0^2 + \sum_{j=0}^j (\|y_{\bar{x}}^{j+1}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^j\|_0^2)\tau \leq M(\|y^0\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^0\|_0^2 + \sum_{j=0}^j \|\varphi^{j'}\|_0^2 \tau)$, (5)
 где $M = const > 0$, не зависящая от h и τ .

Доказательство. Априорную оценку найдем методом энергетических неравенств. Введем скалярные произведения и норму $(u, v) = \sum_{i=1}^{N-1} u_i v_i h$, $\|u\|_0^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2 h$, $(u, u) = (1, u^2) = \|u\|_0^2$.

Справедлива

Лемма [12, с. 120]. Для всякой функции $y(x)$, заданной на равномерной сетке $\bar{\omega}_h = \{x_i = ih, i = 0, 1, \dots, N, x_0 = 0, x_N = l\}$ и обращающейся в нуль при $x = 0$ и $x = l$, справедливы оценки $\frac{h^2}{4} \|y_{\bar{x}}\|_0^2 \leq \|y\|_0^2 \leq \frac{l^2}{8} \|y_{\bar{x}}\|_0^2$.

Получим некоторые вспомогательные неравенства с учетом леммы

$$(y, \mathcal{H}_h y) = \left(y, y + \frac{h^2}{12} y_{\bar{x}x}\right) = (y, y) - \left(1, \frac{h^2}{12} (y_{\bar{x}})^2\right) \leq \left(1, y^2 - \frac{1}{3} y^2\right) \leq \left(1, \frac{2}{3} y^2\right) = \frac{2}{3} \|y\|_0^2,$$

$$\left(1, \left(y + \frac{h^2}{12} y_{\bar{x}x}\right)^2\right) = \left(1, y^2 + \frac{2h^2}{12} y y_{\bar{x}x} + \frac{h^4}{144} y_{\bar{x}x}^2\right) = \left(1, y^2 - \frac{2h^2}{12} (y_{\bar{x}})^2 + \frac{h^4}{144} y_{\bar{x}x}^2\right).$$

Рассмотрим справедливое неравенство

$$\left(1, y^2 - \frac{2h^2}{12} (y_{\bar{x}})^2\right) \leq \left(1, \left(y + \frac{h^2}{12} y_{\bar{x}x}\right)^2\right) \leq \left(1, y^2 + \frac{h^4}{144} y_{\bar{x}x}^2\right). \quad (6)$$

На основе приведенной выше леммы из (6) получаем

$$\left(1, y^2\right) - \frac{2}{3} \left(1, y^2\right) \leq \left(1, \left(y + \frac{h^2}{12} y_{\bar{x}x}\right)^2\right) \leq \left(1, y^2\right) + \frac{1}{9} \left(1, y^2\right).$$

Итак, имеем

$$\frac{1}{3} \|y\|_0^2 \leq \|\mathcal{H}_h y\|_0^2 \leq \frac{10}{9} \|y\|_0^2. \quad (7)$$

Найдём априорную оценку методом энергетических неравенств. Умножим уравнение (3) скалярно на $Y = y^j + y^{j+1}$:

$$(Y, \mathcal{H}_h y_t) = \frac{1}{2}(aY_{\bar{x}x}, Y) + A(y_{\bar{x}xt}, Y) - \frac{1}{2}(d\mathcal{H}_h Y, Y) + (\mathcal{H}_h \varphi, Y). \quad (8)$$

Преобразуем слагаемые, входящие в (7), с учетом (6) и леммы:

$$(Y, \mathcal{H}_h y_t) = \left(y^{j+1} + y^j, y_t + \frac{h^2}{12} y_{\bar{x}xt}\right) = \left(y^{j+1} + y^j, y_t\right) +$$

$$+ \left(y^{j+1} + y^j, \frac{h^2}{12} y_{\bar{x}xt}\right) = \left(y^{j+1} + y^j, \frac{1}{\tau}(y^{j+1} - y^j)\right) -$$

$$- \frac{h^2}{12} \left(y_{\bar{x}}^{j+1} + y_{\bar{x}}^j, \frac{1}{\tau}(y_{\bar{x}}^{j+1} - y_{\bar{x}}^j)\right) = (\|y\|_0^2)_t - \frac{h^2}{12} (\|y_{\bar{x}}\|_0^2)_t \geq$$

$$\geq (\|y\|_0^2)_t - \frac{1}{3} (\|y\|_0^2)_t = \frac{2}{3} (\|y\|_0^2)_t; \quad \frac{1}{2}(aY_{\bar{x}x}, Y) = -\frac{1}{2}(a, (Y_{\bar{x}})^2);$$

$$A(y_{\bar{x}xt}, Y) = -A(y_{\bar{x}t}, Y_{\bar{x}}) = A\left(\frac{1}{\tau}(y_{\bar{x}}^{j+1} - y_{\bar{x}}^j), (y_{\bar{x}}^{j+1} + y_{\bar{x}}^j)\right) =$$

$$= -\left(A, \frac{1}{\tau} \left((y_{\bar{x}}^{j+1})^2 - (y_{\bar{x}}^j)^2\right)\right) \leq -c_0 (\|y_{\bar{x}}\|_0^2)_t;$$

$$-\frac{1}{2}(d\mathcal{H}_h Y, Y) = -\frac{1}{2}(dY, Y) - \frac{h^2}{24}(dY, Y_{\bar{x}x}) = -\frac{1}{2}(d, Y^2) + \frac{h^2}{24}(d, (Y_{\bar{x}})^2) \leq$$

$$\leq \frac{c_2}{2} \|Y\|_0^2 + \frac{h^2 c_2}{24} \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 \leq \frac{c_2}{2} \|Y\|_0^2 + \frac{c_2}{3} \|Y\|_0^2 \leq \frac{5c_2}{6} \|Y\|_0^2; \quad (\mathcal{H}_h \varphi, Y) \leq \frac{1}{2} \|Y\|_0^2 + \frac{1}{2} \|\mathcal{H}_h \varphi\|_0^2.$$

Учитывая полученные преобразования, из (8) находим

$$(\|y\|_0^2)_t + (\|y_{\bar{x}}\|_0^2)_t + \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 \leq M_1 \|Y\|_0^2 + M_2 \|\mathcal{H}_h \varphi\|_0^2. \quad (9)$$

Здесь и далее M_i , $i = 1, 2, \dots$, – положительные постоянные числа, зависящие только от входных данных рассматриваемой задачи.

Просуммируем (9) по j' от 0 до j , умножив обе части на τ . Получим

$$\begin{aligned} & \|y^{j+1}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^{j+1}\|_0^2 + \sum_{j'=0}^j \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 \tau \leq \\ & \leq M_1 \sum_{j'=0}^j \|Y\|_0^2 \tau + M_2 \left(\sum_{j'=0}^j \|\mathcal{H}_h \varphi\|_0^2 \tau + \|y^0\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^0\|_0^2 \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Преобразуем первое слагаемое в правой части (10) с учётом неравенства $(a+b)^2 \leq a^2 + b^2$:

$$\begin{aligned} & \sum_{j'=0}^j \|Y\|_0^2 \tau = \sum_{j'=0}^j \|y^{j+1} + y^j\|_0^2 \tau \leq 2 \sum_{j'=0}^j (\|y^{j+1}\|_0^2 + \|y^j\|_0^2) \tau = \\ & = 2 \sum_{j'=0}^j \|y^{j+1}\|_0^2 \tau + 2 \sum_{j'=0}^j \|y^j\|_0^2 \tau = 2 \sum_{j'=1}^{j+1} \|y^j\|_0^2 \tau + \\ & + 2 \sum_{j'=0}^j \|y^j\|_0^2 \tau = 2 \|y^{j+1}\|_0^2 + 2 \|y^0\|_0^2 + 4 \sum_{j'=1}^j \|y^j\|_0^2 \tau. \end{aligned} \quad (11)$$

Учитывая (11), из (10) находим

$$\begin{aligned} & (1 - 2M_1\tau) \|y^{j+1}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^{j+1}\|_0^2 + \sum_{j'=0}^j \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 \tau \leq \\ & \leq M_1 \sum_{j'=0}^j \|y\|_0^2 \tau + M_2 \left(\sum_{j'=0}^j \|\mathcal{H}_h \varphi\|_0^2 \tau + \|y^0\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^0\|_0^2 \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Выбирая $\tau \leq \tau_0 = \frac{1}{4M_1}$, из (12) находим

$$\begin{aligned} & \|y^{j+1}\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^{j+1}\|_0^2 + \sum_{j'=0}^j \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 \tau \leq \\ & \leq M_2 \sum_{j'=0}^j \|y\|_0^2 \tau + M_3 \left(\sum_{j'=0}^j \|\mathcal{H}_h \varphi\|_0^2 \tau + \|y^0\|_0^2 + \|y_{\bar{x}}^0\|_0^2 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Из (13) на основании разностного аналога леммы Гронуолла [13, с. 171] и (7) находим оценку (5), из которой следуют единственность решения разностной задачи (3), (4), а также непрерывная зависимость решения задачи от входных данных. В (5) $M = M_3 e^{M_2 t_j}$.

Пусть $u(x, t)$ – решение задачи (1); $y(x_i, t_j) = y_i^j$ – решение разностной задачи (3), (4). Для оценки точности разностной схемы (3), (4) рассмотрим разность $z_i^j = y_i^j - u_i^j$, где $u_i^j = u(x_i, t_j)$. Подставляя $y = z + u$ в соотношения (1), получаем задачу для функции z

$$\mathcal{H}_h z_t = \frac{1}{2} a Z_{\bar{x}x} + A z_{\bar{x}xt} - \frac{1}{2} d \mathcal{H}_h Z + \mathcal{H}_h \Psi, Z_0^j = Z_N^j = 0, z(x_i, 0) = 0, \quad (14)$$

где $\Psi = O(h^4 + \tau^2)$ – погрешности аппроксимации дифференциальной задачи (1) разностной схемой (3), (4) в классе решений $u = u(x, t)$ задачи (1).

Применяя оценку (5) к решению задачи (14), получаем неравенство

$$\|z^{j+1}\|_0^2 + \|z_{\bar{x}}^{j+1}\|_0^2 + \sum_{j'=0}^j \|Z_{\bar{x}}\|_0^2 \tau \leq M_4 \sum_{j'=0}^j \|\mathcal{H}_h \Psi\|_0^2 \tau, \quad (15)$$

где $M = \text{const} > 0$, не зависящая от h и τ .

Из априорной оценки (15) следует сходимость решения разностной задачи (3), (4) к решению дифференциальной задачи (1) в смысле нормы $\|z^{j+1}\|_1^2$ на каждом слое так, что существует такое τ_0 , что при $\tau \leq \tau_0$ справедлива оценка $\|y^{j+1} - u^{j+1}\|_1 \leq M(h^4 + \tau^2)$, где $\|z^{j+1}\|_1^2 = \|z^{j+1}\|_0^2 + \|z_{\bar{x}}^{j+1}\|_0^2 + \sum_{j'=0}^j \|Z_{\bar{x}}\|_0^2 \tau$.

Заключение

Получена априорная оценка в разностной форме, означающая единственность решения и его непрерывную зависимость от входных данных задачи. В предположении существования точного решения в классе достаточно гладких функций, а также в силу линейности рассматриваемой задачи это неравенство позволяет утверждать сходимость приближенного решения к точному решению со скоростью $O(h^4 + \tau^2)$.

Список источников

1. Рубинштейн Л.И. К вопросу о процессе распространения тепла в гетерогенных средах // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1948. Т.12, № 1. С. 27–45.
2. Аллэр М. Эффективный потенциал воды при высыхании почвы // Термодинамика почвенной влаги. Л.: Гидрометеоздат, 1966. С. 325–360.
3. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. М.: Наука, 1976. 352 с.

4. Баренблат Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Прикладная математика и механика. 1960. Т. 25, № 5. С. 852–864.
5. Дзекцер Е.С. Уравнения движения подземных вод со свободной поверхностью в многослойных средах // Докл. АН СССР. 1975. Т. 220, № 3. С. 540–543.
6. Толстых А.И. Компактные разностные схемы и их применение в задачах аэродинамики. М.: Наука, 1990. 230 с.
7. Lele S.K. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution // J. of Computational Physics. 1992. Vol. 103, № 1. P. 16–42.
8. 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.
9. Бештоков М.Х. Метод Римана для решения нелокальных краевых задач для псевдопараболических уравнений третьего порядка // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Физ.-мат. науки. 2013. № 4 (33). С. 15–24.
10. Бештоков М.Х. Краевые задачи для нагруженных псевдопараболических уравнений дробного порядка и разностные методы их решения // Изв. вузов. Математика. 2019. № 2. С. 3–12.
11. Бештоков М.Х. Численное исследование начально-краевых задач для уравнения соболевского типа с дробной по времени производной // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 2019. Т. 59, № 2. С. 185–202.
12. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 656 с.
13. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 415 с.

References

1. Rubinshteyn L.I. On the question of the process of heat propagation in heterogeneous media. *Izv. AN SSSR. Ser. Geogr.* 1948;12(1):27-45. (In Russ.).
2. Aller M. Effective water potential when soil dries. *Thermodynamics of soil moisture*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1966:325-360. (In Russ.).
3. Chudnovskiy A.F. *Soil thermophysics*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 352 p. (In Russ.).
4. Barenblat G.I., Zheltov Yu.P., Kochina I.N. On the basic concepts of the theory of filtration of homogeneous fluids in fractured rocks. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1960;25(5):852-864. (In Russ.).
5. Dzekter E.S. Equations of motion of groundwater with a free surface in multilayer media. *Dokl. AN SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1975;220(3):540-543. (In Russ.).
6. Tolstykh A.I. *Compact difference schemes and their application in problems of aerodynamics*. Moscow: Nauka Publ.; 1990. 230 p. (In Russ.).
7. Lele S.K. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution. *Journal of Computational Physics*. 1992;103(1):16-42.
8. Sun Z.Z. On the compact difference scheme for heat equation with Neuman boundary conditions. *Numer. Methods Partial Diff. Eqns.* 2009;25:1320-1341.
9. Beshtokov M.Kh. The Riemann method for solving non-local boundary value problems for pseudoparabolic equations of the third order. *Vestn. Samarskogo gos. tekhn. un-ta. Fiziko-matematicheskie nauki = Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2013;(4):15-24. (In Russ.).
10. Beshtokov M.Kh. Boundary-value problems for loaded pseudoparabolic equations of fractional order and difference methods of their solving. *Russian Mathematics*. 2019;63(2):1-10.
11. Beshtokov M.Kh. Numerical analysis of initial-boundary value problem for a Sobolev-type equation with a fractional-order time derivative. *Comput. Math. and Mathem. Phys.* 2019;59(2):175-192.
12. Samarskiy A.A. *Theory of difference schemes*. Moscow: Nauka Publ.; 1983. 656 p. (In Russ.).
13. Samarskiy A.A., Gulin A.V. *Stability of difference schemes*. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 415 p. (In Russ.).

Информация об авторе

М.Х. Бештоков – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник.

Information about the author

M.Kh. Beshtokov - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 24.05.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 24.05.2023; approved after reviewing 03.07.2023; accepted for publication 30.10.2023.

Научная статья
УДК 532.5, 556
doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-18-33

СТАЦИОНАРНАЯ ВРАЩАТЕЛЬНО-СИММЕТРИЧНАЯ КОНВЕКЦИЯ ПРИ ИЗОТАХОФОРЕЗЕ В КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ С НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ СВОБОДНОЙ НЕПРОНИЦАЕМОЙ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Михаил Юрьевич Жуков¹, Ольга Александровна Цывенкова²✉

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

¹myzhukov@sfnu.ru

²oasyvenkova@sfnu.ru✉

Аннотация. Представлены результаты исследования конвективной устойчивости процесса изотахофореза – метода разделения многокомпонентной смеси на индивидуальные компоненты при помощи внешнего электрического поля. Предполагается, что процесс изотахофореза проводится в бесконечном вертикальном круговом цилиндре со свободными боковыми границами. Задача о возникновении стационарной (монотонной, нейтральной) концентрационной гравитационной конвекции сводится к исследованию устойчивости решения задачи, линеаризованной на решении исходной задачи, соответствующем механическому равновесию – финальной стадии процесса изотахофореза, в которой зоны индивидуальных компонент смеси движутся с одинаковой постоянной скоростью в неподвижной жидкости. Показано, что основной вклад в устойчивость/неустойчивость равновесия вносят градиенты концентраций в окрестности границ между зонами индивидуальных компонент. Ввиду сложности построения точного решения, отвечающего механическому равновесию, оно заменено асимптотическим – кусочно-постоянным распределением концентраций, которое является точным решением асимптотического варианта уравнений переноса компонент под действием электрического поля (бездиффузионная модель). Выбор кусочно-постоянного механического равновесия приводит к градиентам концентрации в виде дельта-функций и линейной краевой задаче с дельтаобразными коэффициентами для определения критических параметров возникновения неустойчивости. Построено точное решение задачи (система обыкновенных дифференциальных уравнений с краевыми условиями) и точное дисперсионное соотношение для определения критических параметров (в случае исчезающе-малой диффузии) с использованием метода одномерных возмущений.

Ключевые слова: конвекция, устойчивость, изотахофорез, одномерные возмущения, задача с дельтаобразными коэффициентами

Для цитирования: Жуков М.Ю., Цывенкова О.А. Стационарная вращательно-симметричная конвекция при изотахофорезе в круговой цилиндрической области с недеформируемой свободной непроницаемой боковой поверхностью // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 18–33.

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

Original article

STATIONARY ROTATIONALLY SYMMETRIC CONVECTION DURING ISOTACHOPHORESIS IN A CIRCULAR CYLINDRICAL REGION WITH A NON-DEFORMABLE FREE IMPERMEABLE SIDE SURFACE

Mikhail Yu. Zhukov¹, Olga A. Tsyvenkova²

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

¹myzhukov@sfnu.ru

²oasyvenkova@sfnu.ru✉

© Жуков М.Ю., Цывенкова О.А., 2023

Abstract. The results of a study of the isotachopheresis process convective stability are presented. Isotachopheresis is the method of separation of a multicomponent mixture to individual components by an external electric field. It is assumed that the process of isotachopheresis occur in an infinite vertical circular cylinder with free side boundaries. The problem of the stationary (monotonic, neutral) concentration gravitational convection occurrence is transform to the study of the solution stability for the problem linearized on the solution of the original problem corresponding to the mechanical equilibrium of the final stage of the isotachopheresis process, in which the zones of the individual components of the mixture move with the identical constant velocity in a stationary flow. It is indicated that the main contribution to the stability/instability of the equilibrium is made by concentration gradients in the vicinity of the boundaries between the zones of individual components. Due to the complexity of constructing an exact solution corresponding to mechanical equilibrium, the exact solution replaced by an asymptotic solution (piecewise constant concentration distribution), which, in turn, is an exact solution of the asymptotic version of the transport under action of an electric field component equations (diffusion-free model). The choice of piecewise constant mechanical equilibrium leads to concentration gradients in the form of delta functions and a linear boundary value problem with delta-like coefficients to determine the critical parameters of instability. An exact solution of the problem (a system of ordinary differential equations with boundary conditions) and, using the method of one-dimensional perturbations, an exact dispersion relation for determining critical parameters (in the case of vanishingly small diffusion) is constructed.

Keywords: convection, stability, isotachopheresis, one-dimensional perturbations, a problem with delta-shaped coefficients

For citation: Zhukov M.Yu., Tsyvenkova O.A. Stationary Rotationally Symmetric Convection During Isotachopheresis in a Circular Cylindrical Region with a Non-Deformable Free Impermeable Side Surface. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):18-33. (In Russ.).

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

Введение

Изотахофорез – один из методов разделения многокомпонентной смеси на индивидуальные компоненты при помощи электрического поля. В финальной стадии процесса смесь, помещенная между двумя эталонными электролитами (терминатор и лидер), двигаясь под действием электрического поля, разделяется на отдельные области (зоны), каждая из которых содержит только одну компоненту. При этом все границы между зонами перемещаются с одной и той же постоянной скоростью, а ширина границ крайне мала по сравнению с шириной зон. Именно малость ширины границ обуславливает высокую разрешающую способность метода – уверенную идентификацию индивидуальных компонент смеси. Теория изотахофореза, а также практика его применения подробно изложены в [1–14]. Известно, что малость ширины границ может играть и отрицательную роль. Дело в том, что в окрестности границ между зонами возникает большой градиент концентраций соседних зон. Очевидно, что с уменьшением ширины границы градиент концентраций возрастает. Проведение процесса в вертикальных сосудах, например в цилиндрической электрофоретической камере, может приводить к возникновению конвективного перемешивания жидкости и тем самым к разрушению границ (или даже к их полному уничтожению) и ухудшению разрешающей способности метода разделения.

В работе [15] была предложена и изучена асимптотическая модель для описания конвективной неустойчивости при изотахофорезе непосредственно для окрестности одной границы между зонами. Считалось, что ширина соседних зон настолько велика, что влияние границ между другими зонами на конвекцию в окрестности выбранной границы пренебрежимо мало. Идея построения простой математической модели конвективной неустойчивости границы заключалась в замене достаточно сложного (описываемого трансцендентной функцией Лерха) точного решения, отвечающего механическому равновесию, на асимптотическое решение, имеющее линейный профиль. Для этого необходимо заменить и уравнение переноса компонент на некоторое асимптотическое уравнение, решение которого соответствует линейному профилю. Подчеркнем, что замена точного решения исходной задачи (механическое равновесие) асимптотическим и одновременная модификация исходных уравнений асимптотическими крайне важны. Дело в том, что линеаризация исходной задачи на решении, которое не является решением исходной задачи, с последующим исследованием устойчивости линейной задачи

может привести к непредсказуемым последствиям в случае, когда для исследования устойчивости используются обычные методы – поиск точного решения, линеаризация, определение критических параметров устойчивости/неустойчивости.

В представленной работе решена более реалистичная по сравнению с [15] задача. Рассматривается задача о стационарной конвекции в круговом цилиндре (реальная модель электрофоретической камеры), тогда как в [15] исследована конвекция в плоском горизонтальном слое. Учтено влияние всех (а не только одной) границ между зонами на возникновение конвекции. В качестве асимптотического решения, отвечающего механическому равновесию, выбрана кусочно-постоянная функция, а не кусочно-линейная.

Ограничение рассмотрения стационарной конвекции связано с тем, что в случае конвекции в вертикальных цилиндрах наиболее опасной с точки зрения неустойчивости является именно стационарная конвекция (монотонная, нейтральная) [16, гл. III]. Выбор в качестве решения, соответствующего механическому равновесию, кусочно-постоянного решения обусловлен не только тем, что такая ситуация наблюдается на практике. В случае кусочно-постоянного профиля концентраций, фактически линейной комбинации функций Хевисайда градиент концентраций (производная в направлении оси цилиндра) является линейной комбинацией дельта-функций и линейная спектральная задача для определения критических чисел неустойчивости представляет интересную с математической точки зрения задачу о многомерном возмущении для оператора L_0 ($Lw(z) = 0$, $Lw(z) \equiv L_0w(z) + \sum_k a_k w(z_k)\delta(z - z_k)$). Здесь a_k – постоянные коэффициенты; $\delta(z - z_k)$ – дельта-функции Дирака; z_k – набор точек (в данном случае – координаты границ между зонами).

Некоторым отклонением от реальности можно считать задание на боковых границах цилиндра краевых условий, соответствующих непроницаемым недеформируемым свободным границам (обычно электрофоретическая камера имеет твердые стенки). Однако такие условия можно трактовать как некоторые условия типа Навье или считать, что на границе учтен эффект электроосмоса [17]. Упрощения сделаны лишь для того, чтобы иметь возможность построить точное решение задачи. Практически вся схема построения решения останется прежней, если заменить свободные границы твердыми. Но тогда вместо точных формул придется проводить численные расчёты.

В представленной статье на основе идей работы [15] о выборе асимптотического решения, отвечающего механическому равновесию, и одновременной модификации соответствующего уравнения исходной задачи описаны различные варианты механических равновесий, среди которых выбран вариант с кусочно-постоянным профилем. Построено точное решение линейной задачи гидродинамической неустойчивости и получено соотношение для определения параметров неустойчивости. В случае, когда безразмерный параметр, характеризующий диффузию, стремится к нулю, показано, что опасной является граница между лидером и смесью. Это соответствует замене задачи для многомерных возмущений $L_0w(z) + \sum_k a_k w(z_k)\delta(z - z_k) = 0$ задачей для одномерного возмущения $L_0w(z) + Aw(z_1)\delta(z - z_{n-1}) = 0$, где A – некоторый параметр, описывающий влияние всех остальных границ z_1, \dots, z_{n-2} , что позволило получить точную формулу (а не некоторое уравнение, требующее численного решения) для дисперсионного соотношения, определяющего параметры неустойчивости.

Постановка задачи

Для описания процесса конвективного перемешивания при изотахофорезе в бесконечном цилиндрическом вертикальном канале для n -компонентной смеси применяем систему уравнений в цилиндрических координатах (r, θ, x_3) , записанную в безразмерных переменных с использованием приближения Обербека – Буссинеска [2, 8, 9, 15] (подробно переход к безразмерным переменным указан в [8, с. 57–59]):

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \tag{1}$$

$$\partial_t \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} - \sum_{m=1}^n \beta^m c^m \mathbf{k}_{x_3}, \tag{2}$$

$$\partial_t c^k + \mathbf{v} \cdot \nabla c^k + \operatorname{div} \mathbf{i}^k = 0, \quad k = 1, \dots, n, \tag{3}$$

$$\mathbf{i}^k = -\varepsilon \mu^k \nabla c^k + \mu^k c^k \mathbf{E}, \quad k = 1, \dots, n, \tag{4}$$

$$\mathbf{j} = S \mathbf{E}, \quad S = \sum_{m=1}^n c^m, \tag{5}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad (6)$$

$$\mathbf{v} = u\mathbf{k}_r + v\mathbf{k}_\theta + w\mathbf{k}_{x_3}, \quad (7)$$

$$\nabla = \mathbf{k}_r \partial_r + \frac{1}{r} \partial_\theta \mathbf{k}_\theta + \mathbf{k}_{x_3} \partial_{x_3}, \quad \partial_\theta \mathbf{k}_r = \mathbf{k}_\theta, \quad \partial_\theta \mathbf{k}_\theta = -\mathbf{k}_r. \quad (8)$$

В (1)–(8) $\mathbf{v} = (u, v, w)$ – скорость; u, v, w – радиальная, азимутальная и вертикальная компоненты скорости; p – давление (конвективное); c^k – «эффективная» концентрация компоненты; \mathbf{i}^k – плотность локального потока концентрации; n – количество компонент смеси; μ – кинематическая вязкость смеси; β^k – коэффициент концентрационного сжатия; $\mu^k > 0$ – подвижность компоненты в электрическом поле (скорость переноса); $\varepsilon \mu^k$ – коэффициент диффузии; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; φ – потенциал электрического поля; \mathbf{j} – плотность электрического тока; S – проводимость смеси; $\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_\theta, \mathbf{k}_{x_3}$ – орты цилиндрической системы координат (r, θ, x_3) (орты $\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_\theta$ зависят только от θ , орт \mathbf{k}_{x_3} является постоянным и направлен против действия силы тяжести); $\partial_t, \partial_r, \partial_\theta, \partial_{x_3}$ – операторы частных производных по соответствующим переменным.

Неизвестными являются скорость $\mathbf{v}(r, \theta, x_3, t)$, давление $p(r, \theta, x_3, t)$, концентрации $c^k(r, \theta, x_3, t)$, $k = 1, \dots, n$, и потенциал $\varphi(r, \theta, x_3, t)$. Все параметры $\varepsilon, \mu, \mu^k, \beta^k, k = 1, \dots, n$, предполагаются постоянными и известными. Уравнения (1)–(6) записаны именно для цилиндрических координат. На это указывают представление скорости (аналогично для других векторов) в виде разложения по ортам (7), вид оператора ∇ и соотношения для дифференцирования ортов (8). Следует помнить, что оператор $\Delta = \nabla \cdot \nabla = \nabla^2$ по-разному действует на скалярные и векторные величины. Например, $\Delta \mathbf{v} = -\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{v}) + \nabla \operatorname{div} \mathbf{v}$. При необходимости можно использовать традиционную покомпонентную запись [18, с. 76].

Замечание. При записи уравнений (1)–(7), как и в большинстве математических работ по теории изотохофореза [1, 9–13, 15, 16, 19] использованы «эффективные» концентрации c^i и коэффициенты концентрационного сжатия β^i , которые связаны соотношениями $\tilde{c}^i = \frac{c^i}{\mu^i + \mu^0}$,

$$\beta^i = \frac{\tilde{\beta}^i + \tilde{\beta}^0}{\mu^i + \mu^0}.$$

Здесь $\tilde{c}^i, \tilde{\beta}^i$ – обычные «физические» величины; \tilde{c}^i – молярная концентрация, моль/л; $\mu^0, \tilde{\beta}^0$ – подвижность и коэффициент концентрационного сжатия противоиона \tilde{c}^0 , концентрация которого определяется уравнением электронейтральности $\tilde{c}^0 = \sum_i \tilde{c}^i$. Числа переноса $t_i = (\mu^i / (\mu^i + \mu^0))$, принятые в литературе по электрохимии [5], в работе не используются. По физическому смыслу «эффективные» концентрации c^i – это молярные проводимости соответствующих индивидуальных компонент.

Считаем, что область \mathbb{D} , в которой происходит течение жидкости и проводится процесс изотохофореза, представляет собой круговой цилиндр, бесконечный в направлении x_3 и радиуса R . Почти все результаты, приводимые ниже, справедливы для цилиндра с произвольным сечением, и цилиндр выбран круговым лишь для упрощения громоздких соотношений.

Предполагаем, что боковая поверхность цилиндра является непроводящей электрический ток (электроизолированная) и непроницаемой для концентрации (и жидкости) границей. В этом случае краевые условия для уравнений (1)–(6) имеют вид

$$(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})|_{r=R} = 0, \quad (\mathbf{n} \cdot \nabla \varphi)|_{r=R} = 0, \quad (\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}^k)|_{r=R} = 0, \quad (9)$$

где \mathbf{n} – нормаль к боковой поверхности; R – радиус цилиндра.

На оси цилиндра должны быть выполнены условия:

$$u|_{r=0} = 0, \quad v|_{r=0} = 0, \quad \partial_r u|_{r=0} = 0, \quad \partial_r v|_{r=0} = 0, \quad \partial_r w|_{r=0} = 0, \quad (10)$$

$$\partial_r \varphi|_{r=0} = 0, \quad \partial_r c^k|_{r=0} = 0, \quad k = 1, \dots, n.$$

Боковую поверхность цилиндра считаем недеформируемой и свободной – при $r = R$ касательные напряжения на границе отсутствуют (о причинах выбора вместо условий прилипания, т.е. $\mathbf{v}|_{r=R} = 0$, условий отсутствия касательных напряжений подробно сказано во введении):

$$\sigma_{rx_3}|_{r=R} \equiv \mu(\partial_r w + \partial_{x_3} u)|_{r=R} = 0, \quad \sigma_{r\theta}|_{r=R} \equiv \mu \left(\frac{1}{r} \partial_\theta u + \partial_r v - \frac{1}{r} v \right)|_{r=R} = 0. \quad (11)$$

В (11) $\sigma_{rx_3}, \sigma_{r\theta}$ – касательные напряжения на боковой поверхности кругового цилиндра [18, с. 76].

Считаем, что на бесконечности течение жидкости вдоль оси x_3 отсутствует, напряженность электрического поля и плотность электрического тока имеют лишь постоянные осевые компоненты:

$$w|_{x_3 \rightarrow \mp\infty} = 0, \quad \mathbf{E}|_{x_3 \rightarrow \mp\infty} \rightarrow (0, 0, E^{\mp\infty}), \quad \mathbf{j}|_{x_3 \rightarrow \mp\infty} \rightarrow (0, 0, j^0), \quad (12)$$

где $E^{\mp\infty}, j^0$ – заданные константы.

В случае n -компонентной смеси для концентраций $c^k, k = 1, \dots, n$, полагаем

$$\begin{aligned} c^1|_{x_3 \rightarrow -\infty} = s_1, \quad c^k|_{x_3 \rightarrow -\infty} = 0, \quad k = 2, \dots, n, \\ c^n|_{x_3 \rightarrow +\infty} = s_n, \quad c^k|_{x_3 \rightarrow +\infty} = 0, \quad k = 1, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь s_1, s_n – заданные величины концентраций.

Для компонент с концентрациями c^2, c^3, \dots, c^{n-1} задаем массы (точнее, количество вещества):

$$\int_0^R r dr \int_0^{2\pi} d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} c^k(r, \theta, x_3, t) dx_3 = \pi R^2 M_k, \quad k = 2, \dots, n-1, \quad (14)$$

где M_k – заданные (средние) массы.

В бесконечном цилиндре массы компонент c^1 и c^n считаются бесконечными. Распределение концентраций (13) является типичным для изотахофореза. Смесь, состоящая из концентраций c^2, c^3, \dots, c^{n-1} , расположена между двумя концентрациями – терминатором c^1 и лидером c^n . Подробнее о процессе изотахофореза – в [1–14] (в [13, 14] изотахофорез называют методом подвижной границы).

Величины подвижностей компонент μ^k удовлетворяют неравенствам

$$0 < \mu^1 < \mu^2 < \dots < \mu^{n-1} < \mu^n. \quad (15)$$

Терминатор имеет наименьшую подвижность, лидер – наибольшую. Значения остальных подвижностей должны заключаться между μ_1 и μ_n (важно несоответствие подвижностей μ^k , а упорядоченность значения достигается перенумерацией компонент).

Цель работы – исследование возможности возникновения гравитационного конвективного перемешивания основного режима течения и переноса веществ, соответствующего финальной стадии изотахофореза [1–14].

Механическое равновесие

Задача (1)–(15) допускает решение, соответствующее механическому равновесию, при котором жидкость неподвижна, а компоненты смеси движутся под действием электрического поля с постоянной скоростью – финальная стадия процесса изотахофореза

$$\mathbf{v}(r, \theta, x_3, t) = (0, 0, 0), \quad \mathbf{E}(r, \theta, x_3, t) = (0, 0, E^0(z)), \quad \mathbf{j}(r, \theta, x_3, t) = (0, 0, j^0), \quad (16)$$

$$c^k(r, \theta, x_3, t) = c_0^k(z), \quad k = 1, \dots, n, \quad S(r, \theta, x_3, t) = S^0(z) = \sum_{m=1}^n c_0^m(z), \quad (17)$$

$$z = x_3 - Vt, \quad E^0(z) = \frac{j^0}{S^0(z)}. \quad (18)$$

Здесь j^0 – заданная плотность тока в осевом направлении; V – скорость переноса компонент смеси; $E^0(z), c_0^k(z)$ – известные функции (см. ниже); z – автомодельная переменная (в движущейся системе координат (r, θ, z) компоненты смеси неподвижны).

Функции $c_0^k(z)$ определены решением следующей задачи:

$$-V \partial_z c_0^k + \partial_z \left(-\varepsilon \mu^k \partial_z c_0^k + j^0 \frac{\mu^k c_0^k}{s_0} \right) = 0, \quad k = 1, \dots, n, \quad (19)$$

$$c_0^1(-\infty) = s_1, \quad c_0^n(+\infty) = s_n, \quad c_0^k(\mp\infty) = s_k, \quad k = 2, \dots, n-1, \quad (20)$$

где s_i – некоторые константы. В бездиффузионном приближении, т.е. при $\varepsilon = 0$, решение задачи (19), (20) кусочно-постоянно и записывается в форме

$$c_0^1(z) = s_1 h(z_1 - z), \quad c_0^n(z) = s_n h(z - z_{n-1}), \quad (21)$$

$$c_0^k(z) = s_k (h(z - z_{k-1}) - h(z - z_k)), \quad k = 2, \dots, n-1,$$

где $h(z)$ – функция Хевисайда; значения s_k и z_k определены с учетом (14) соотношениями

$$s_k = \frac{j^0 \mu^k}{V}, \quad k = 1, \dots, n, \quad (22)$$

$$L_k = z_k - z_{k-1} = \frac{M_k}{s_k}, \quad k = 2, \dots, n-1. \quad (23)$$

Устойчивость в данном случае в смысле «неразрушаемости» кусочно-постоянного решения (21) обеспечивается выполнением неравенств (15) [2, 8].

В теории изотахофореза области $\mathbb{Z}_k = \{z: z_{k-1} < z < z_k\}$, содержащие только одну компоненту с концентрацией $c^k = s_k$, называются зонами; z_k – граница между зонами \mathbb{Z}_k и \mathbb{Z}_{k+1} ; L_k – размер (длина или ширина) зоны \mathbb{Z}_k ; (22) – соотношения Кольрауша. Для существования решения (21) значения s_1 и s_n в силу (22) не могут задаваться произвольно. Как правило, задается

концентрация лидера s_n , а величина концентрации терминатора s_1 подбирается в соответствии с (22). Кроме этого, соотношение (23) не позволяет определить все z_k – одно из значений, чаще всего z_1 , задается и фактически определяет начало отсчёта на бесконечной оси z . Подробно теория изотохофореза в бездиффузионном приближении изложена в [1–11].

При $\varepsilon \neq 0$ можно построить и точное решение задачи (19), (20) [2, с. 135–142]. Фрагмент такого решения показан на рис. 1 – окрестность границы z_k между зонами \mathbb{Z}_k и \mathbb{Z}_{k+1} . При наличии диффузии ($\varepsilon \neq 0$) такое решение (окрестность границы z_k) имеет вид [2, с. 135–142; 8, с. 31–34; 15]

$$c_0^k(y) = \frac{S(y)}{1+y}, \quad c_0^{k+1}(y) = \frac{yS(y)}{1+y}, \quad (24)$$

$$S(y) = \frac{j_0 \mu^k \mu^{k+1}}{V(\mu^{k+1} - \mu^k)} (1+y) y^{-q_k} \int_0^y \frac{\tau^{q_k-1} d\tau}{1+\tau}, \quad (25)$$

$$y = y_k \exp(\Lambda_k(z - z_k)), \quad y_k S_{yy}(y_k) + S_y(y_k) = 0, \quad (26)$$

$$\Lambda_k = \frac{V(\mu^{k+1} - \mu^k)}{\mu^k \mu^{k+1} \varepsilon} > 0, \quad q_k = \frac{\mu^{k+1}}{\mu^{k+1} - \mu^k} > 1.$$

В [2, с. 135–142; 8, с. 31–34] показано, что корень уравнения (26) для определения y_k зависит лишь от q_k , удовлетворяет оценке $q_k(q_k - 1)^{-1} < y_k < \infty$, и для вычисления y_k можно использовать метод Ньютона, выбирая в качестве начального приближения $y_{k,*} = q_k(q_k - 1)^{-1}$.

Решение задачи (19), (20) в виде (24)–(26) описывает структуру ударной волны, в которую это решение «вырождается» при $\varepsilon \rightarrow +0$ (отсутствие диффузии). Функция $S(y)$ представляет собой один из вариантов записи трансцендентной функции Лерха при помощи интегралов [8, с. 64–65; 20, с. 43–46]. Полное решение задачи (19), (20), справедливое на всей оси $-\infty < z < +\infty$, не приведено ввиду крайней громоздкости соотношений. При $\varepsilon \rightarrow +0$ это решение стремится к кусочно-постоянному (21).

Известно [16], что решающую роль при возникновении концентрационной гравитационной конвекции играют градиенты концентраций. Ввиду сложностей, возникающих при вычислении функции Лерха (или интеграла в соотношении (25)), в [15] была предложена и исследована асимптотическая модель, при построении которой в случае $\varepsilon \rightarrow 0$ уравнения (4), (5) заменялись уравнениями

$$\frac{dc^k}{dt} + \text{div}(-\varepsilon \mu^k \nabla c^k + c^k V \mathbf{k}) = 0, \quad (27)$$

$$\mathbf{k} = (0, 0, 1),$$

с прежними условиями (13), (14), уравнения (19) – уравнениями

$$-V c_z^k - \varepsilon \mu^k c_{zz}^k + V c_z^k = 0 \quad (28)$$

также с прежними условиями (20).

В этом случае в окрестности $z \in (a_k, b_k)$ границы z_k решение, отвечающее механическому равновесию, имеет вид линейных функций

$$c_0^k(z) = s_k \frac{z - b_k}{b_k - a_k}, \quad c_0^{k+1}(z) = s_{k+1} \frac{a_k - z}{b_k - a_k}, \quad (29)$$

$$a_k < z < b_k,$$

$$c_0^k(z) = s_k, \quad b_{k-1} < z < a_k, \quad c_0^{k+1}(z) = s_{k+1}, \quad (30)$$

$$a_{k+1} > z > b_k,$$

«сшитых» с константами s_k, s_{k+1} в некоторой области вне окрестности $z \in (a_k, b_k)$. Величины a_k, b_k задают «ширину» границы z_k и находятся из соотношений

$$S_z(z_k)(a_k - z_k) + S(z_k) = s_k, \quad (31)$$

$$S_z(z_k)(b_k - z_k) + S(z_k) = s_{k+1}, \quad S_{zz}(z_k) = 0.$$

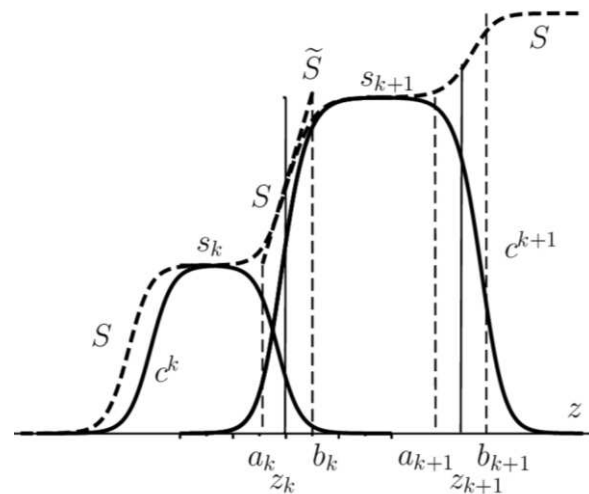


Рис. 1. Окрестность границы между двумя зонами; $c^k(z), c^{k+1}(z)$ – концентрации компонент; $S(z)$ – проводимость смеси; $\tilde{S}(z)$ – касательная к функции $S(z)$ в точке $z = z_k$; $z \in (a_k, b_k)$ – окрестность границы z_k , $z = x_3 - Vt$; x_3 – вертикальная координата; V – скорость движения границы между зонами / Fig. 1. The vicinities of the boundary between two zones, $c^k(z), c^{k+1}(z)$ are the concentrations of components, $S(z)$ is the conductivity of the mixture, $\tilde{S}(z)$ is the tangent to the function $S(z)$ at the point $z = z_k$, $z \in (a_k, b_k)$ is the vicinity of the boundary z_k , $z = x_3 - Vt$, x_3 is the vertical coordinate, $(S^0(z) = \sum c_0^k(z)), (S^0(z) = \sum c_0^k(z)), V$ is the velocity of the boundary movement between zones

Иными словами, строится касательная $\tilde{S} = S_z(z_k)(z - z_k) + S(z_k)$ к функции $S(z)$ в точке перегиба $z = z_k$. Координаты точек пересечения касательной с линиями $S = s_k$, $S = s_{k+1}$ определяют a_k , b_k (рис. 1 и подробнее в [15]).

Заметим, что замена уравнений (4), (5) на (27) и (19) на (28) должна осуществляться с сохранением вида функций $c_0^k(z)$ (либо (29), (30), либо (21)) для того, чтобы сохранялась связь с решением вида (24)–(26), соответствующего механическому равновесию исходной задачи. Дело в том, что уравнения (28) допускают произвольное кусочно-постоянное решение (при $\varepsilon = 0$), никак не связанное с исходной задачей.

Линеаризованная задача

Для исследования устойчивости [16] рассматривается задача (1)–(15), линеаризованная на решении, соответствующем механическому равновесию (16)–(30). Перед проведением процедуры линеаризации следует указать, какое именно решение $c_0^k(z)$ выбрано в качестве механического равновесия. В случае, когда $c_0^k(z)$ имеет вид типа (24)–(26), линеаризуется полная исходная система уравнений, т.е. (1)–(6). Если $c_0^k(z)$ задано в виде (21) или (29), (30), то линеаризуются уравнения (1), (2), а (3)–(6) заменяются уравнениями (27). Заметим, что в случае выбора $c_0^k(z)$ в форме (21) или (29), (30) фактически игнорируются возмущения напряженности электрического поля \mathbf{E} и плотности электрического тока \mathbf{j} .

Для определенности ограничимся случаем, когда $c_0^k(z)$ задано соотношениями (21), и решение исходной задачи разыскиваем в виде

$$\mathbf{v}(r, \theta, x_3, t) = \gamma \tilde{\mathbf{v}}(r, \theta, z) = \gamma(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}), \quad p(r, \theta, x_3, t) = p_0(z) + \gamma \tilde{p}(r, \theta, z), \quad (32)$$

$$c^k(r, \theta, x_3, t) = c_0^k(z) + \gamma \tilde{c}^k(r, \theta, z), \quad z = x_3 - Vt,$$

где \tilde{v} , \tilde{p} , \tilde{c}^k – амплитуды возмущений; γ – параметр, характеризующий малость возмущений.

Соотношения (32) соответствуют рассмотрению стационарной в движущейся системе координат $z = x_3 - Vt$ конвекции. Отсутствие явной зависимости от времени t у возмущений отвечает также исследованию устойчивости со сдвигом [19], т.е. устойчивости бегущих волн.

Линеаризованные уравнения имеют вид

$$\operatorname{div} \tilde{\mathbf{v}} = 0, \quad (33)$$

$$-V \partial_z \tilde{\mathbf{v}} = -\nabla \tilde{p} + \mu \Delta \tilde{\mathbf{v}} - \sum_{m=1}^n \beta^m \tilde{c}^m \mathbf{k}_z, \quad (34)$$

$$\tilde{w} \partial_z c_0^k - \varepsilon \mu^k \Delta \tilde{c}^k = 0, \quad k = 1, \dots, n, \quad (35)$$

и дополнены линеаризованными краевыми условиями:

$$\tilde{u}|_{r=R} = 0, \quad \partial_r \tilde{c}^k|_{r=R} = 0, \quad \partial_r \tilde{c}^k|_{r=0} = 0, \quad (36)$$

$$\tilde{u}|_{r=0} = 0, \quad \tilde{v}|_{r=0} = 0, \quad \partial_r \tilde{u}|_{r=0} = 0, \quad \partial_r \tilde{v}|_{r=0} = 0, \quad \partial_r \tilde{w}|_{r=0} = 0,$$

$$(\partial_r \tilde{w} + \partial_z \tilde{u})_{r=R} = 0, \quad \left(\frac{1}{r} \partial_\theta \tilde{u} + \partial_r \tilde{v} - \frac{1}{r} \tilde{v} \right)_{r=R} = 0, \quad (37)$$

$$\int_0^R r dr \int_0^{2\pi} d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{c}^k(r, \theta, z) dz = 0, \quad k = 1, \dots, n, \quad (38)$$

а также соотношениями для $\partial_z c_0^k(z)$, полученными при помощи (21):

$$\partial_z c_0^1(z) = -s_1 \delta(z - z_1), \quad \partial_z c_0^n(z) = s_n \delta(z - z_{n-1}), \quad (39)$$

$$\partial_z c_0^k(z) = s_k (\delta(z - z_{k-1}) - \delta(z - z_k)), \quad k = 2, \dots, n - 1.$$

Здесь $\delta(z)$ – дельта-функция Дирака.

Линеаризованная задача (33)–(38) практически совпадает с линеаризованной задачей для концентрационной гравитационной конвекции [16, гл. VII]. Существенное отличие заключается в том, что градиенты концентраций $\partial_z c_0^k(z)$ отличны от нуля не во всей области, а лишь на некоторых определенных конечных участках и движутся со скоростью V .

Вращательно-симметричные возмущения

Наиболее интересным с точки зрения авторов является случай вращательно-симметричных возмущений, когда возмущения азимутальной скорости отсутствуют ($\tilde{v} = 0$), а все остальные (\tilde{u} , \tilde{w} , \tilde{p} , \tilde{c}_0^k) не зависят от θ (т.е. в задаче (33)–(39) считается, что $\partial_\theta = 0$). Дело в том, что задача исследования стационарной конвекции практически в указанном случае полностью аналогична (при $V = 0$) классической задаче Рэлея – Бенара о конвекции в горизонтальном слое с

недеформируемыми свободными границами [5, 16] – роль такой свободной границы ввиду условия (11) играет недеформируемая боковая поверхность кругового цилиндра. Как и для задачи Рэлея – Бенара, удается построить точное решение задачи (33)–(39), свести к минимуму объём вычислений для определения критических чисел возможного возникновения конвекции, а также наглядно продемонстрировать особенности решения задачи с дельтаобразными функциями в уравнениях (35).

Действуя [16, с. 33] оператором *rotrot* на уравнение (34) и проектируя результат на орт \mathbf{k}_z , получим уравнение только для вертикальной компоненты скорости \tilde{w} (даже в общем случае, когда $\tilde{v} \neq 0$ и имеется зависимость возмущений от угла θ)

$$-V\Delta \partial_z \tilde{w} = \mu \Delta^2 \tilde{w} - \sum_{m=1}^n \beta^m \Delta_r \tilde{c}^m. \quad (40)$$

Здесь $\Delta_r = \Delta - \partial_z^2$ – плоский лапласиан.

С учетом (35) после действия оператором Δ на скалярное уравнение (40) получаем уравнение для \tilde{w}

$$-V\Delta^2 \partial_z \tilde{w} = \mu \Delta^3 \tilde{w} - \sum_{m=1}^n \frac{\beta^m \partial_z c_0^m}{\varepsilon \mu^m} \Delta_r \tilde{w}, \quad (41)$$

которое дополняем условиями:

$$\partial_r \tilde{c}^k|_{r=R} = 0, \quad \partial_r \tilde{c}^k|_{r=0} = 0, \quad \partial_r \tilde{w}|_{r=0} = 0, \quad \partial_r \tilde{w}|_{r=R} = 0. \quad (42)$$

Заметим, что $\partial_r \tilde{w}|_{r=R} = 0$ следует из условий $(\partial_r \tilde{w} + \partial_z \tilde{u})_{r=R} = 0$ и продифференцированного по z условия $\tilde{u}|_{r=R} = 0$.

Решение задачи (41), (42) разыскиваем в виде

$$\tilde{w}(r, z) = W(z)J_0(\alpha r), \quad (43)$$

где J_0 – функция Бесселя; αR – какой-либо ненулевой корень уравнения

$$\partial_r J_0(\alpha r)|_{r=R} = -\alpha J_1(\alpha R) = 0, \quad (44)$$

что соответствует автоматическому удовлетворению краевых условия (42) для \tilde{w} .

Краевые условия (11), отвечающие свободной боковой границе, выбраны для того, чтобы иметь возможность упростить вид функции $\tilde{w}(r, z)$. Параметр α является некоторым аналогом волнового числа в классической задаче Рэлея – Бенара.

В случае (43) возмущения скорости \tilde{u} и концентрации \tilde{c}^k имеют вид

$$\tilde{c}^k(r, z) = C^k(z)J_0(\alpha r), \quad \tilde{u}(r, z) = \frac{1}{\alpha} \partial_z W(z) J_1(\alpha r). \quad (45)$$

Это означает, что краевые условия (42) для \tilde{c}^k и условия (36) для \tilde{u} выполнены, как и для \tilde{w} из (43), автоматически.

Спектральная задача

Подстановка решения (43) в уравнение (41) с учетом соотношений (39) для $\partial_z c_0^k(z)$ и соотношений Кольрауша (22) приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для $W(z)$:

$$-V(D^2 - \alpha^2)^2 DW(z) = \mu(D^2 - \alpha^2)^3 W(z) + \frac{j^0 \alpha^2}{\varepsilon V} F(z)W(z), \quad D = \frac{d}{dz}, \quad (46)$$

где

$$\sum_{m=1}^n \frac{\beta^m \partial_z c_0^m}{\varepsilon \mu^m} = \frac{j^0}{\varepsilon V} F(z), \quad F(z) = \sum_{k=1}^{n-1} (\beta^{k+1} - \beta^k) \delta(z - z_k). \quad (47)$$

Функции $F(z)W(z)$ и $F(z)$ являются линейной комбинацией дельта-функций с постоянными коэффициентами

$$F(z)W(z) = \sum_{k=1}^{n-1} (\beta^{k+1} - \beta^k) W(z_k) \delta(z - z_k). \quad (48)$$

Способ решения уравнений с дельта-коэффициентами указан в [21, с. 115]. Пусть $G_k(z)$ – решение однородного уравнения

$$-V(D^2 - \alpha^2)^2 DG_k(z) = \mu(D^2 - \alpha^2)^3 G_k(z) \quad (49)$$

с условиями

$$G_k(z_k) = DG_k(z_k) = D^2 G_k(z_k) = D^3 G_k(z_k) = D^4 G_k(z_k) = 0, \quad D^5 G_k(z_k) = 1. \quad (50)$$

Тогда решение уравнения (46) записывается в форме

$$W(z) = W_0(z) + \alpha_*^2 \sum_{k=1}^{n-1} (\beta^{k+1} - \beta^k) W(z_k) G_k(z) h(z - z_k), \quad \alpha_*^2 = \frac{j^0 \alpha^2}{\varepsilon V}, \quad (51)$$

$$-V(D^2 - \alpha^2)^2 DW_0(z) = \mu(D^2 - \alpha^2)^3 W_0(z), \quad (52)$$

где h – функция Хевисайда; $W_0(z)$ – общее решение однородного уравнения; α_*^2 – параметр, введенный для удобства и уменьшения громоздкости формул.

Подчеркнем, что $W_0(z)$ и $G_k(z)$ являются различными функциями, хотя и удовлетворяют одному и тому же уравнению ((49) и (52)). Функции $G_k(z)$ – это решение неоднородной задачи (49), (50), тогда как $W_0(z)$ – общее решение однородного уравнения (52) и определено с точностью до шести (в данном случае) произвольных констант.

Рассматривая соотношение (51) в точках $z = z_i$ и принимая во внимание, что $G_k(z_k) = 0$ (см. (50)), получим систему линейных уравнений с треугольной матрицей для определения $W(z_i)$

$$W(z_i) = W_0(z_i) + \alpha_*^2 \sum_{k=1}^{i-1} b_{ik} W(z_k), \quad i = 1, \dots, n-1, \quad \alpha_*^2 = \frac{j^0 \alpha^2}{\varepsilon V}, \quad (53)$$

$$b_{ik} = (\beta^{k+1} - \beta^k) G_k(z_i), \quad k \leq i-1, \quad i = 1, \dots, n-1. \quad (54)$$

Нетрудно показать, что в конечном итоге $W(z_i)$ представляются в виде линейной комбинации $W_0(z_m)$, $m = 1, \dots, i$:

$$W(z_i) = \sum_{m=1}^i a_{im} W_0(z_m), \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (55)$$

где коэффициенты a_{im} определены соотношениями

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1, \quad a_{22} = 1, \quad a_{33} = 1, \quad a_{44} = 1, \quad a_{21} = \alpha_*^2 b_{21}, \quad a_{32} = \alpha_*^2 b_{32}, \quad a_{43} = \alpha_*^2 b_{43}, \\ a_{31} &= \alpha_*^2 b_{31} + \alpha_*^4 b_{32} b_{21}, \quad a_{42} = \alpha_*^2 b_{42} + \alpha_*^4 b_{43} b_{32}, \\ a_{41} &= \alpha_*^2 b_{41} + \alpha_*^4 (b_{42} b_{21} + b_{43} b_{31}) + \alpha_*^6 (b_{43} b_{32} b_{21}). \end{aligned} \quad (56)$$

Ввиду громоздкости общих формул здесь приведены лишь некоторые коэффициенты a_{im} . Соотношения (56) дают полное представление об образовании структуры коэффициентов и при необходимости могут быть без труда продолжены.

Соотношение (51) с учетом (55) принимает вид

$$W(z) = W_0(z) + \alpha_*^2 \sum_{k=1}^{n-1} (\beta^{k+1} - \beta^k) \sum_{m=1}^k a_{km} W_0(z_m) G_k(z) h(z - z_k). \quad (57)$$

Чтобы определить критические числа, при которых возможно возникновение конвекции, необходимо сформулировать спектральную задачу, дополнив систему уравнений (46) краевыми условиями. До сих пор считалось, что область D в направлении z бесконечна, т.е. $-\infty < z < +\infty$. Решение, описывающее механическое равновесие, т.е. рассматриваемый основной режим течения (см. (16)–(18), (21)), соответствует ситуации, когда при $z < z_1$ и $z > z_{n-1}$ течение жидкости отсутствует, $c_0^k(z) = 0$, $k = 2, \dots, n-1$; при $z < z_1$ $c_0^1(z) = s_1 = const$; при $z > z_{n-1}$ $c_0^n(z) = s_n = const$. Иными словами, области $z < z_1$ и $z > z_{n-1}$ являются «неопасными» для возникновения конвекции ввиду отсутствия течения и градиентов концентраций. Представляется разумным заменить бесконечную область на некоторую конечную $z \in [0, L]$, такую, что

$$z_0 = 0 < z_1 < z_2 < \dots, z_{n-1} < L = z_n, \quad (58)$$

где L – длина конечной области (выбор за начало области $z = z_0 = 0$ означает выбор начала отсчёта координаты z на бесконечной оси); $z_0 = 0$, $z_n = L$ или $[z_0, z_n] = [0, L]$. В частности, обозначения позволяют считать, что в соотношениях (23) индекс изменяется в пределах $k = 1, \dots, n$ и L_0, L_n – длина зоны терминатора и лидера (рис. 2).

Заметим, что на практике область, в которой происходит процесс изотохофореза, естественно, конечная. С физической точки зрения выбор конечной области означает наличие некоторых (неподвижных в системе координат z) фиктивных границ z_0, z_n , через которые протекает жидкость со скоростью V . Такая интерпретация справедлива до тех пор, пока z_{n-1} не достигнет неподвижной границы, т.е. зона \mathbb{Z}_{n-1} не должна исчезать. Ширина зон $\mathbb{Z}_1, \mathbb{Z}_n$ не является постоянной (сокращается со скоростью V), ширина всех остальных зон $\mathbb{Z}_2, \dots, \mathbb{Z}_{n-1}$ остаётся неизменной в течение финальной стадии процесса изотохофореза.

В качестве краевых условий для системы уравнений (46) выберем обычные условия сшивания решений на границах области, которые с учетом отсутствия течения вне конечной области имеют вид

$$W(0) = DW(0) = D^2W(0) = 0, \quad W(L) = DW(L) = D^2W(L) = 0. \quad (59)$$

В принципе, можно выбирать и иные условия, например, соответствующие свободным границам, задавая нулевыми функцию и её производные чётного порядка [15; 16, с. 33].

Заметим, что решение уравнений (46) уже построено (см. (57)) и достаточно подставить (59) в (57).

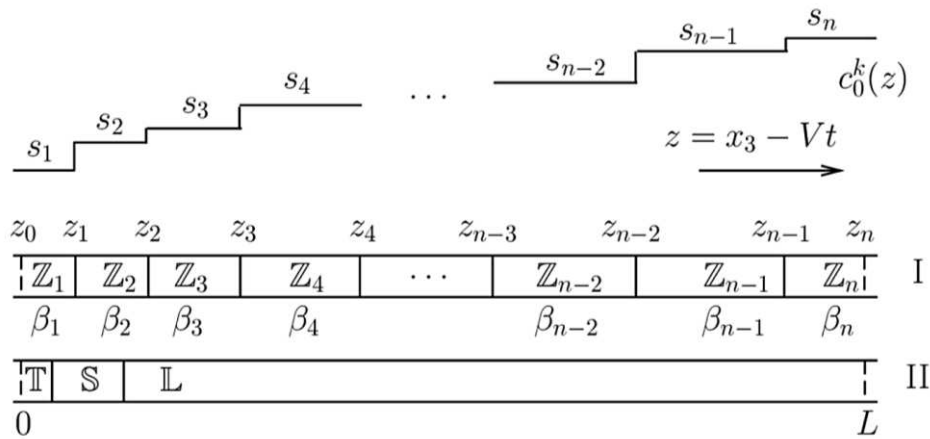


Рис. 2. Схема изотахофореза: $c_0^k(z)$ – кусочно-постоянное распределение концентраций; β^k – коэффициенты концентрационной сжимаемости («плотности») компонент; $S^0(z)$ – проводимость смеси ($S^0(z) = \sum c_0^k(z)$); $z_0 = 0, z_n = L$ – фиктивные границы конечной области. Распределение концентраций в окрестности границ зон показано на рис. 1 / Fig. 2. Scheme of isotachopheresis: $c_0^k(z)$ - piecewise constant distribution of concentrations; β^k - coefficients of concentration compressibility (“density”) of the components; $S^0(z)$ - mixture conductivity ($S^0(z) = \sum c_0^k(z)$). The distribution of concentrations in the vicinity of the zone boundaries is shown in Fig. 1

Вычисляя производные с учетом (58), т.е. принимая во внимание, что для функций Хевисайда справедливы соотношения $h(L - z_k) = 1, h(0 - z_k) = 0, k = 1, \dots, n - 1$, получим

$$W(0) = W_0(0) = 0, \quad DW(0) = DW_0(0) = 0, \quad D^2W(0) = D^2W_0(0) = 0. \quad (60)$$

$$W(L) = W_0(L) + \alpha_*^2 \sum_{k=1}^{n-1} (\beta^{k+1} - \beta^k) \sum_{m=1}^k a_{km} W_0(z_m) G_k(L) = 0, \quad (61)$$

$$DW(L) = DW_0(L) + \alpha_*^2 \sum_{k=1}^{n-1} (\beta^{k+1} - \beta^k) \sum_{m=1}^k a_{km} W_0(z_m) DG_k(L) = 0,$$

$$D^2W(L) = D^2W_0(L) + \alpha_*^2 \sum_{k=1}^{n-1} (\beta^{k+1} - \beta^k) \sum_{m=1}^k a_{km} W_0(z_m) D^2G_k(L) = 0.$$

$$\mathbb{M}_0[W_0] \equiv W(L), \quad \mathbb{M}_1[W_0] \equiv DW(L), \quad \mathbb{M}_2[W_0] \equiv D^2W(L).$$

Здесь для удобства дальнейшего изложения введены обозначения для линейных функционалов $\mathbb{M}_0[W_0], \mathbb{M}_1[W_0], \mathbb{M}_2[W_0]$, действующих на функции W_0 .

Задача (46), (59) для определения $W(z)$ преобразуется к более простой задаче для уравнения (52) с краевыми условиями (60), (61). В общем случае решение однородной задачи (52), (60), (61) зависит от шести постоянных, но при специальном выборе фундаментальных решений однородных уравнений, удовлетворяющих автоматически условиям (60), количество постоянных можно сократить до трёх, записывая решение в форме

$$W_0(z) = \sum_{k=0}^2 A_k \Phi_k(z), \quad (62)$$

где A_k – произвольные константы, функции $\Phi_k(z)$ определены соотношениями

$$\Phi_0(z) = 2\sinh(\alpha z) - 2\alpha z \cosh(\alpha z), \quad (63)$$

$$\Phi_1(z) = \exp(\sigma_1 z) + k_{11}(z) \cosh(\alpha z) + k_{12}(z) \sinh(\alpha z),$$

$$\Phi_2(z) = \exp(\sigma_2 z) + k_{21}(z) \cosh(\alpha z) + k_{22}(z) \sinh(\alpha z),$$

$$\sigma_r = -\frac{V}{2\mu}, \quad \sigma_i = \frac{1}{2\mu} (V^2 + 4\alpha^2 \mu^2)^{1/2}, \quad \sigma_1 = \sigma_r - \sigma_i, \quad \sigma_2 = \sigma_r + \sigma_i, \quad (64)$$

$$k_{11}(z) = -1 - \alpha z - \sigma_1 z, \quad k_{12}(z) = 1 + \frac{V\sigma_1}{2\alpha\mu} z, \quad k_{21}(z) = -1 - \alpha z - \sigma_2 z, \quad k_{22}(z) = 1 + \frac{V\sigma_2}{2\alpha\mu} z.$$

Естественно, $\sigma_1, \sigma_2, \pm\alpha, \pm\alpha$ – шесть корней (с учетом кратности) характеристического уравнения $\mu(\Lambda^2 - \alpha^2)^3 + V(\Lambda^2 - \alpha^2)^2 \Lambda = 0$. Легко убедиться, что функции $\Phi_k(z)$, а следовательно, и $W_0(z)$ удовлетворяют условиям (60).

Приведем также явный вид функций $G_k(z)$ (решение задачи (49), (50)), необходимых для оставшихся уравнений (61)

$$G(y) = e^{\sigma_r y} (k_1 \sinh(\sigma_i y) - k_2 \cosh(\sigma_i y)) + k_2 (k_0(y) \sinh(\alpha y) + \cosh(\alpha y)),$$

$$k_0(y) = \frac{(2\mu - Vy)\alpha}{2V}, \quad k_1 = \frac{(V^2 + 2\alpha^2 \mu^2)}{2\alpha^4 \sigma_i V^2}, \quad k_2 = -\frac{\mu}{V\alpha^4}, \quad (65)$$

$$G_k(z) = G(z - z_k). \quad (66)$$

Окончательно спектральная задача для определения критических параметров возможного возникновения стационарной конвекции принимает вид (см. (62) и определение функционалов в (61))

$$\det(\mathbb{H}) = 0, \quad \mathbb{H} \equiv \begin{pmatrix} M_0[\Phi_0] & M_0[\Phi_1] & M_0[\Phi_2] \\ M_1[\Phi_0] & M_1[\Phi_1] & M_1[\Phi_2] \\ M_2[\Phi_0] & M_2[\Phi_1] & M_2[\Phi_2] \end{pmatrix} = 0. \quad (67)$$

Здесь \mathbb{H} – матрица 3×3 , зависимость элементов которой от параметров задачи будет указана далее.

Анализ решения и асимптотика

Напомним, что процесс изотахофореза состоит из двух стадий. Смесь веществ $\mathbb{S} = \{c^2, \dots, c^{n-1}\}$ помещается между терминатором $\mathbb{T} = \{c^1\}$ и лидером $\mathbb{L} = \{c^n\}$, как показано на рис. 2, П. На первом этапе после достаточно малого интервала времени, в течение которого происходит формирование зон, устанавливается финальный режим, который рассматривается в представленной работе. Смесь разделяется на отдельные зоны $\mathbb{Z}_k = \{c^k\}$, содержащие только одно вещество (рис. 2, I). Границы между зонами движутся с одинаковой скоростью V , которая определяется концентрацией s_n и подвижностью μ_n лидера. Все остальные концентрации, включая концентрацию терминатора, определены величинами s_n , подвижностью μ_n и их подвижностями μ_k (соотношение Кольрауша (22)):

$$V = \frac{j^0 \mu_n}{s_n}, \quad s_k = \frac{\mu_k}{\mu_n} s_n, \quad k = 1, \dots, n-1. \quad (68)$$

Положение границ z_k между зонами (в движущейся системе координат) определяется соотношениями (23), которые с учетом (22) записываются в форме

$$z_k = \frac{\mu_n}{s_n} \sum_{i=2}^k \frac{M_i}{\mu_i} + z_1 = \frac{V}{j^0} \sum_{i=2}^k \frac{M_i}{\mu_i} + z_1, \quad k = 2, \dots, n-1. \quad (69)$$

Как уже говорилось (см. (58) и следующий за формулой текст), можно считать, что $0 < z_1 \approx 0$ и $L > z_{n-1} \approx L$, т.е. определять длину области соотношением

$$L \approx \frac{\mu_n}{s_n} \sum_{i=2}^{n-1} \frac{M_i}{\mu_i} = \frac{V}{j^0} \sum_{i=2}^{n-1} \frac{M_i}{\mu_i}. \quad (70)$$

Таким образом, если известны подвижности μ_k и массы M_k , $k = 1, \dots, n$, то требуемые в задаче величины z_k и V определяются при помощи (68)–(70) величиной концентрации лидера s_n . В практике изотахофореза одним из основных параметров как раз и является величина s_n . Однако с учетом (68) гораздо удобнее считать основным параметром скорость V и определять величину s_n . Подробнее о процессе изотахофореза – в [1–14].

Обратим внимание на то, что параметр α (аналог волнового числа в классической задаче конвекции) в данном случае не является непрерывным. Дискретные значения параметра определяются уравнением (44). Фактически αR – это корни функции Бесселя $J_1(\alpha R)$. В частности, $\alpha_1 R \approx 3,832$, $\alpha_2 R \approx 7,016$, $\alpha_3 R \approx 10,173$. Корни функции J_1 с относительной точностью не менее 10^{-5} можно вычислять по формуле (более точная – в [22, с. 133])

$$\alpha_k R \approx \eta - \frac{3}{8\eta}, \quad \eta = k\pi + \frac{\pi}{4}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (71)$$

Значения $\alpha_k R$ определяют вид зависимости возмущений $\tilde{w}(r, z)$, $\tilde{c}^k(r, z)$, $\tilde{u}(r, z)$ от радиальной координаты r . На рис. 3 показаны некоторые возможные варианты возмущений (вторичные режимы конвекции). Дискретность параметра α означает, что обычная нейтральная кривая – зависимость какого-либо параметра от волнового числа – будет также дискретной.

Наиболее важным набором параметров с точки зрения конвективной неустойчивости является множество коэффициентов концентрационной сжимаемости β^k , $k = 1, \dots, n$, характеризующих стратификацию смеси по плотности. Формально можно считать параметры β^k «плотностями» компонент. В данном случае именно разности плотностей зон ($\beta^{k+1} - \beta^k$) в архимедовой силе (плавучесть, buoyancy), определяемой функцией $F(z)$ (см. (47)), приводят к возможной конвективной неустойчивости в окрестности границ z_k между зонами. Во избежание недоразумений напомним, что для конвективного перемешивания важны не сами различия между концентрациями, а градиенты концентраций. Однако в данном асимптотическом случае «ширина» границ не определена и градиенты концентраций $\partial_z c_0^k(z)$ в окрестности границ z_k пропорциональны дельта-функциям $\delta(z - z_i)$ (см. (39)). Иными словами, уместно именно разности ($\beta^{k+1} - \beta^k$) считать «градиентами» концентраций.

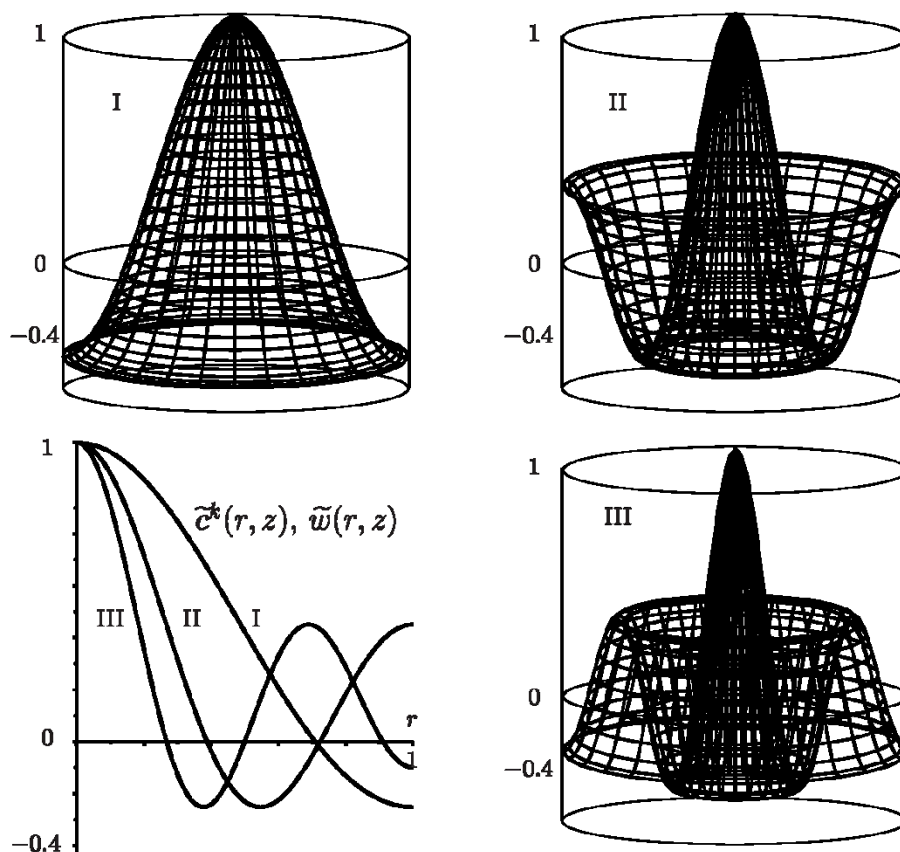


Рис. 3. Возможные варианты профилей возмущений $\tilde{w}(r, z)$, $\tilde{c}^k(r, z)$ (зависимость от радиальной координаты r при фиксированном значений z) для различных значений дискретного параметра α : I – $\alpha_1 R \approx 3,832$; II – $\alpha_2 R \approx 7,016$; III – $\alpha_3 R \approx 10,173$, $R = 1$ / Fig. 3. Possible variants of the perturbation profiles $\tilde{w}(r, z)$, $\tilde{c}^k(r, z)$ (dependence on the radial coordinate r at a fixed value of z) for different values of the discrete parameter α . I - $\alpha_1 R \approx 3.832$; II - $\alpha_2 R \approx 7.016$; III - $\alpha_3 R \approx 10.173$, $R = 1$

С физической точки зрения по-разному можно трактовать и механизм возникновения неустойчивости. С одной стороны, наличие градиентов концентраций в окрестности границ позволяет считать, что имеет место концентрационная гравитационная конвекция. Именно таким образом в [15] исследована задача о конвективной неустойчивости в окрестности одной границы между зонами, когда в качестве механического равновесия выбраны соотношения (29), (30), а не (39). С другой стороны, наличие чёткой границы z_k между жидкостями с различными «плотностями» β^k , β^{k+1} позволяет считать, что механизм неустойчивости связан с неустойчивостью Рэлея – Тейлора. В последнем случае должно происходить искажение границы между зонами, но в рассматриваемом варианте задачи границы предполагаются плоскими и неискажаемыми. Другими словами, разумно предполагать именно конвективный механизм возникновения неустойчивости.

Если все значения β^k одинаковы ($\beta^1 = \beta^2 = \dots = \beta^n$), то конвективного перемешивания нет. Функция $F(z) = 0$, $b_{ik} = 0$, $a_{im} = 0$, за исключением $a_{ii} = 1$ (см. (47)), (54), (56)), $W(z) = W_0(z)$ (см. (53)). Задача для уравнений (52) с условиями (60), (61), определяющая $W_0(z)$, имеет лишь тривиальное нулевое решение $W_0(z) \equiv 0$, и, что эквивалентно, функция $H \neq 0$ (см. (67)). Для того чтобы в этом убедиться, достаточно умножить уравнение (52) на $W_0(z)$ и проинтегрировать с использованием интегрирования по частям и краевых условий (60), (61). Заметим, что такой вывод о $W_0(z) \equiv 0$ может быть получен, если справедливы условия (60), (61). Если вместо (60), (61) выбрать равенство нулю только чётных производных (как для свободной границы), то результат будет неверен. Это косвенно подтверждает правильность требования условий сшивания (60), (61) взамен условий на свободной границе.

Учитывая, что для описания механического равновесия использованы асимптотические (при $\varepsilon \rightarrow 0$) соотношения (21), имеет смысл и далее применять асимптотику, выделяя главный член

коэффициентов a_{im} по степеням параметра ε^{-1} . Анализ соотношений (56) показывает, что таким главным членом является коэффициент $a_{n-1,1}$, точнее, его часть, имеющая порядок $O(\varepsilon^{-(n-2)})$:

$$a_{n-1,1} \sim a = \alpha_*^{2(n-2)} b_{n-1,n-2} b_{n-2,n-3} \dots b_{3,2} b_{2,1} = \alpha_*^{2(n-2)} \prod_{k=1}^{n-2} b_{k+1,k} = O(\varepsilon^{-(n-2)}), \quad (72)$$

которая, в свою очередь, с учетом (54), (66) записывается в форме

$$a = \alpha_*^{2(n-2)} \prod_{k=1}^{n-2} (\beta^{k+1} - \beta^k) G(z_{k+1} - z_k). \quad (73)$$

Тогда соотношение (57) (и аналогичные соотношения, в частности (61)) принимает вид

$$W(z) = W_0(z) + \alpha_*^2 (\beta^n - \beta^{n-1}) a_{n-1,1} W_0(z_1) G(z - z_{n-1}) h(z - z_{n-1}). \quad (74)$$

Особенно отметим, что соотношение (74) справедливо только в ситуации общего положения (!), когда все разности $(\beta^{k+1} - \beta^k) \neq 0$ и $z_1 \neq 0$, $z_{n-1} > L$. Более того, $W(z) \neq W_0(z)$ только при $z > z_{n-1}$. В частности, соотношение (74) нельзя использовать для описания зависимости отклонений $W(z)$ от $W_0(z)$ при $z < z_{n-1}$ – для этого требуются оценки всех коэффициентов a_{im} , а не только $a_{n-1,1}$.

Тем не менее, ввиду того что в (61) требуются значения функций $W(L)$, $DW(L)$, $D^2W(L)$ (т.е. при $z > z_{n-1}$), именно формула (74) при $0 < z_1$ и $z_{n-1} < L$ позволяет вычислять критические значения параметров, при которых возможно возникновение конвекции.

С учетом (53), (66), (72), (73) приведем соотношения (фактически для $W(L)$, $DW(L)$, $D^2W(L)$), необходимые при вычислении функционалов $\mathbb{M}_m[W_0]$, $m = 0, 1, 2$, в (61) и (67):

$$\mathbb{M}_m[W_0] = D^m W_0(L) + \mathcal{R} W_0(z_1) D^m G(L - z_{n-1}), \quad (75)$$

$$\mathcal{R} = \left(\frac{j^0 \alpha_*^2}{\varepsilon V} \right)^{n-1} \prod_{k=1}^{n-1} (\beta^{k+1} - \beta^k) \prod_{k=1}^{n-2} G(z_{k+1} - z_k). \quad (76)$$

Здесь \mathcal{R} – аналог числа Рэлея в классической задаче конвекции [16].

Задачу (67) удобно записать в форме спектральной задачи для определения спектрального параметра \mathcal{R}

$$\mathbb{H}_0 \mathbf{X} + \mathcal{R}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \mathbf{W} = 0, \quad (77)$$

где \mathbb{H}_0 – матрица; \mathbf{X} , \mathbf{W} – векторы; \mathbf{U} – ковектор (сопряжённый вектор, вектор-строка, функционал); (\mathbf{X}, \mathbf{U}) – скалярное произведение (действие функционала \mathbf{U} на вектор \mathbf{X} , которые определены соотношениями (см., в частности, (62)).

$$\mathbb{H}_0 \equiv \begin{pmatrix} \Phi_0(L) & \Phi_1(L) & \Phi_2(L) \\ D\Phi_0(L) & D\Phi_1(L) & D\Phi_2(L) \\ D^2\Phi_0(L) & D^2\Phi_1(L) & D^2\Phi_2(L) \end{pmatrix}, \quad (78)$$

$$\mathbf{U} \equiv (\Phi_0(z_1), \Phi_1(z_1), \Phi_2(z_1)), \quad \mathbf{W} \equiv \begin{pmatrix} G(L - z_{n-1}) \\ DG(L - z_{n-1}) \\ D^2G(L - z_{n-1}) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} \equiv \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix}.$$

Задача (77) является спектральной для пучка матриц \mathbb{H}_0 и \mathbb{B}

$$\mathbb{H}_0 \mathbf{X} + \mathcal{R} \mathbb{B} \mathbf{X} = 0, \quad \mathbb{B}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \mathbf{W} = 0. \quad (79)$$

Матрица \mathbb{B} необратима, и (79) нельзя свести к обычной спектральной задаче для одной матрицы. Однако задача (77) сходна со спектральной для одномерно возмущенной матрицы \mathbb{H}_0 с параметром ε_0

$$\mathbb{H}_0 \mathbf{X} + \varepsilon_0(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \mathbf{W} = \lambda \mathbf{X}. \quad (80)$$

Её решение имеет вид

$$\frac{1}{\varepsilon_0} = \sum_{s=1}^3 \frac{(\mathbf{W}, \boldsymbol{\psi}^s)(\boldsymbol{\varphi}^s, \mathbf{U})}{\lambda - \lambda_s}, \quad \mathbb{H}_0 \boldsymbol{\varphi}^s = \lambda_s \boldsymbol{\varphi}^s, \quad \mathbb{H}_0^* \boldsymbol{\psi}^s = \lambda_s \boldsymbol{\psi}^s, \quad (81)$$

где λ_s , $\boldsymbol{\varphi}^s$ – собственные значения и соответствующие им собственные векторы матрицы \mathbb{H}_0 ; $\boldsymbol{\psi}^s$ – собственные векторы матрицы \mathbb{H}_0^* ; $(\boldsymbol{\varphi}^s, \boldsymbol{\psi}^k) = \delta_{sk}$.

Метод одномерных возмущений достаточно хорошо известен и часто называется методом окаймления [23, с. 115; 24, с. 214], для двухмерных возмущений – [2, с. 106–109; 25], многомерных – [26].

Полагая в (81) $\lambda = 0$ и $\varepsilon_0 = \mathcal{R}$, получим точное (!) соотношение для определения \mathcal{R}

$$\frac{1}{\mathcal{R}} = - \sum_{s=1}^3 \frac{(\mathbf{W}, \boldsymbol{\psi}^s)(\boldsymbol{\varphi}^s, \mathbf{U})}{\lambda_s}. \quad (82)$$

Можно вычислить определитель матрицы $\mathbb{H}_0 \mathbf{X} + \varepsilon_0(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \mathbf{W}$, что достаточно просто для матрицы 3×3 . Тем не менее с точки зрения всевозможных обобщений на случай многомерных возмущений предпочтительно использование именно (82).

Матрица \mathbb{H}_0 зависит от значений функций Φ_0, Φ_1, Φ_2 в точках $z_0 = 0, z_n = L$. В свою очередь, функции Φ_0, Φ_1, Φ_2 полностью определены дискретными значениями α и отношением V/μ (см. (63)–(66)). Для определения \mathbf{U} дополнительно требуются значения функции Φ_0, Φ_1, Φ_2 в точке $z = z_1$. Кроме этого, \mathbf{W} зависит от значений функции G в точке $L - z_{n-1}$ и параметров $\alpha, V/\mu$. Для вычисления величины \mathcal{R} необходима почти минимальная информация о детальном составе смеси. Требуется длина области L , скорость движения зон V/μ , ширина зоны терминатора z_1 , ширина зоны лидера $L - z_{n-1}$ и дискретное значение параметра α , как правило, наименьший корень уравнения (44). Такой набор параметров соответствует выбору режима проведения процесса изотахофореза. Напротив, вся важная информация о составе смеси и параметрах компонент фактически включена в параметр \mathcal{R} – коэффициенты концентрационного сжатия β^k , величины z_k , зависящие от подвижностей μ^k и количества веществ M_k .

Значения z_k задаются формулой (69), которую удобно, вводя обозначения, записать как

$$g_k = \frac{\mu M_k}{j^0 \mu_k}, \quad z_k - z_{k-1} = g_k \frac{V}{\mu}, \quad L - z_{n-1} = g_0 \frac{V}{\mu}, \quad g_0 = \sum_{k=2}^{n-1} g_k, \quad (83)$$

где g_k – некоторые новые параметры.

Величина $L - z_{n-1}$, условно внесенная в первую группу параметров, как это следует из (83), зависит от состава смеси, т.е. от g_0 . Однако такая зависимость имеет «интегральный» характер, и можно считать, что $L - z_{n-1}$ является независимым параметром, и, соответственно, подбирать значения индивидуальных параметров g_k .

Ввиду построения точной асимптотической формулы (82) для определения критических параметров, а также наличия большого количества параметров задачи, значения которых зачастую неизвестны, достаточно бессмысленно, по крайней мере в этой работе, приводить результаты расчётов для какой-либо конкретной смеси. Укажем только, что для использования (82) в работе представлены все требуемые функции и соотношения (см. (78), (63)–(65), (76), (83)).

Заключение

Предложены и реализованы сравнительно новые подходы к исследованию задачи о стационарной конвекции при изотахофорезе. Во-первых, это замена уравнений переноса (3), (4) или (19) их асимптотическими аналогами (27), (28). Подчеркнем, что это крайне важная замена. Нельзя, например, заменить точное решение задачи для определения механического равновесия на некоторое асимптотическое решение, а затем использовать линеаризацию точных уравнений на асимптотическом решении. Это неизбежно приведет к неправильному результату при решении соответствующей спектральной задачи для определения критических параметров, соответствующих неустойчивости механического равновесия. Заметим, что такой поход – замена уравнений его асимптотическим аналогом – применялся авторами в [15]. Во-вторых, для упрощения задачи о конвекции в цилиндрической области боковая поверхность цилиндра считалась недеформированной свободной (см. краевые условия (11)), что позволило построить аналитическое (по радиальной координате r) решение для задачи об отыскании возмущений основного режима (см. (43)–(45)). В-третьих, использование в качестве решения, отвечающего механическому равновесию, кусочно-постоянных функций и дельта-функций для производных решения (см. (21), (39)) привело к уравнению с дельта-коэффициентами для определения возмущений ((см. (46), (47))), что позволило построить фактически точное решение спектральной задачи (точно определить матрицу \mathbb{H} , см. (67)). В-четвертых, произведено дальнейшее асимптотическое разложение. В полной спектральной задаче (67) выделены главные члены при исчезающей диффузии ($\varepsilon \rightarrow 0$) и получена новая асимптотическая спектральная задача (см. (72)–(78)). Заметим, что число \mathcal{R} (см. соотношение (76)) фактически описывает некоторый кумулятивный эффект – накопление неустойчивостей границ между зонами от терминатора до лидера.

Список источников

1. Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Юдович В.И. Математическая теория электрофореза: применение к методам фракционирования биополимеров. Киев: Наукова думка, 1983. 241 с.
2. Жуков М.Ю. Массоперенос электрическим полем. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 2005. 216 с.

3. Moore G.T. Theory of isotachopheresis. Development of concentration boundaries // *J. Chromatogr.* 1975. Vol. 106, № 1. P. 1–16.
4. Жуков М.Ю., Юдович В.И. Математическая модель изотахофореза // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267, № 2. С. 334–338.
5. Жуков М.Ю. Методика расчета движения зон и времени полного разделения смеси при изотахофорезе // Молекул. биология. 1984. Вып. 36. С. 28–34.
6. Жуков М.Ю. Нестационарная модель изотахофореза // ЖВМ и МФ. 1984. Т. 24, № 4. С. 549–565.
7. Жуков М.Ю. Уравнения переноса масс для сильно концентрированных многокомпонентных смесей при наличии электрического поля. Модель изотахофореза // Мат. моделирование. 1995. Т. 7, № 4. С. 19–28.
8. Жуков М.Ю., Цывенкова О.А., Ширяева Е.В. Гидродинамика и поведение границ зон при изотахофорезе. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 94 с.
9. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В., Полякова Н.М. Математическое моделирование процессов электрофореза. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2019. 160 с.
10. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Микрогидродинамика, жидкие плёнки и электрофорез. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 240 с.
11. Mosher R.A., Saville D.A., Thorman W. The Dynamics of Electrophoresis. New York: VCH Publishers, 1992. 236 p.
12. Константинов Б.П., Ошуркова О.В. Быстрый микроанализ химических элементов методом подвижной границы // Докл. АН СССР. 1963. Т. 148, № 5. С. 1110–1113.
13. Степанов А.В., Корчемная Е.К. Электромиграционный метод в неорганическом анализе. М.: Химия, 1979. 328 с.
14. Longsworth L.G. Moving Boundary Electrophoresis // Theory, Electrophoresis: theory, methods, and applications. Bier M., ed. New York: Academic Press, 1959. P. 91–136.
15. Жуков М.Ю., Цывенкова О.А. Моделирование гравитационной концентрационной конвекции при изотахофорезе // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4. С. 27–35. Doi: 10.23683/0321-3005-2019-4-27-35.
16. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
17. Тихомолова К.П. Электроосмос. Л.: Химия, 1989. 248 с.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
19. Кузнецов Ю.А. Существование и устойчивость бегущих волн в системах реакция – диффузия с одной пространственной переменной. Пушино: Науч. центр биол. исследований АН СССР, 1982. 40 с.
20. Бейтман Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. М.: Наука, 1966. Т. 3. 296 с.
21. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1981. 512 с.
22. Корнев Б.Г. Введение в теорию бесселевых функций. М.: Наука, 1971. 288 с.
23. Глазман И.М., Любич Ю.И. Конечномерный линейный анализ. М.: Наука, 1969. 476 с.
24. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984. 320 с.
25. Гуда С.А., Юдович В.И. Совместная задача о вращении твердого тела в вязкой жидкости под действием упругой силы // Сиб. мат. журн. 2007. Т. 48, № 3. С. 446–462.
26. Коняев Ю.А. Об одном методе исследования некоторых задач теории возмущений // Матем. сб. 1993. Т.184, № 12. С. 133–144.

References

1. Babskii V. G., Zhukov M.Yu., Yudovich V.I. *Mathematical theory of electrophoresis. Application to biopolymer fractionation methods*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1983. 241 p. (In Russ.).
2. Zhukov M.Yu. *Mass transport by an electric field*. Rostov-on-Don: Rostov University Press; 2005. 216 p. (In Russ.).
3. Moore G. T. Theory of isotachopheresis. Development of concentration boundaries. *J. Chromatogr.* 1975;106(1):1-16.
4. Zhukov M.Yu., Yudovich V.I. Mathematical model of isotachopheresis. *Dokl. AN SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1982;267(2):334-338. (In Russ.).
5. Zhukov M.Yu. The method of calculating the zones movement and the complete separation time of the mixture during isotachopheresis. *Molekul. biologiya = Molecular Biology*. 1984;(36):28-34. (In Russ.).
6. Zhukov M.Yu. Unsteady isotachopheresis model. *ZhVM i MF = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1984;24(4):549-565. (In Russ.).
7. Zhukov M.Yu. Mass transport equations for highly concentrated multicomponent mixtures in the presence of an electric field. Model of isotachopheresis. *Mat. modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*. 1995;7(4):19-28. (In Russ.).

8. Zhukov M.Yu., Tsyvenkova O. A., Shiryayeva E.V. *Hydrodynamics and behavior of the zone boundaries in isotachophoresis*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2015. 94 p. (In Russ.).
9. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V., Polyakova N. M. *Mathematical modeling of electrophoresis processes*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2019. 160 p. (In Russ.).
10. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. *Microhydrodynamics, liquid films and electrophoresis*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2015. 240 p. (In Russ.).
11. Mosher R. A., Saville D. A., Thorman W. *The Dynamics of Electrophoresis*. New York: VCH Publishers; 1992. 236 p.
12. Konstantinov B. P., Oshurkova O. V. Rapid microanalysis of chemical elements by the moving boundary method. *Dokl. AN SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1963;148(5):1110-1113. (In Russ.).
13. Stepanov A.V., Korchemnaya E. K. *Electromigration method in inorganic analysis*. Moscow: Khimiya Publ.; 1979. 328 p. (In Russ.).
14. Longworth L. G. Moving Boundary Electrophoresis. *Theory, Electrophoresis: theory, methods, and applications*. Ed. M. Bier. New York: Academic Press; 1959:91-136.
15. Zhukov M.Yu., Tsyvenkova O. A. Simulation of gravitational concentration convection in isotachophoresis. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region*. 2019;(4):27-35. Doi: 10.23683/0321-3005-2019-4-27-35. (In Russ.).
16. Gershuni G. Z., Zhukhovitsky E.M. *Convective stability of an incompressible fluid*. Moscow: Nauka Publ.; 1972. 392 p. (In Russ.).
17. Tikhomolova K. P. *Electroosmosis*. Leningrad: Khimiya Publ.; 1989. 248 p. (In Russ.).
18. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Hydrodynamics*. Moscow: Nauka Publ.; 1986. 736 p. (In Russ.).
19. Kuznetsov Yu. A. *Existence and stability of the traveling waves in reaction-diffusion systems with one spatial variable*. Pushchino: Scientific Center for Biological Research of the USSR Academy of Sciences Press; 1982. 40 p. (In Russ.).
20. Bateman G., Erdelyi A. *Higher transcendental function*. Moscow: Nauka Publ.; 1966. Vol. 3. 296 p. (In Russ.).
21. Vladimirov V. S. *Equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. 512 p. (In Russ.).
22. Korenev B. G. *Introduction to the theory of Bessel functions*. Moscow: Nauka Publ.; 1971. 288 p. (In Russ.).
23. Glazman I. M., Lubitsch Yu.I. *Finite-dimensional linear analysis*. Moscow: Nauka Publ.; 1969. 476 p. (In Russ.).
24. Voevodin V.V., Kuznetsov Yu. A. *Matrices and calculations*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 210 p. (In Russ.).
25. Guda S. A., Yudovich V. I. The coupled problem of a solid oscillating in a viscous fluid under the action of an elastic force. *Sib. mat. zhurn. = Siberian Mathematical Journal*. 2007;48(3):446-462. (In Russ.).
26. Konyaev Yu. A. On one method for studying some problems of perturbation theory. *Matem. sb. = Sbornik: Mathematics*. 1993;184(12):133-144. (In Russ.).

Информация об авторах

М.Ю. Жуков – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и математической физики.

О.А. Цывенкова – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра вычислительной математики и математической физики.

Information about the authors

M.Yu. Zhukov - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics.

O.A. Tsyvenkova - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics.

*Статья поступила в редакцию 02.08.2023; одобрена после рецензирования 18.08.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 02.08.2023; approved after reviewing 18.08.2023; accepted for publication 30.10.2023.*

Научная статья

УДК 517.977.1, 62-50

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-34-42

МЕТОД СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ УСЛОВИЯ МАКСИМУМА ФУНКЦИИ ОБОБЩЕННОЙ МОЩНОСТИ И АНАЛИЗА ПУЧКА КВАДРАТИЧНЫХ ФОРМ

Владимир Олегович Зехцер^{1✉}, *Андрей Александрович Костоглотов*²,
*Сергей Валерьевич Лазаренко*³, *Александр Андреевич Агапов*⁴

^{1, 2, 3, 4}Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹vova-zehcer@yandex.ru✉

²kostoglotov@icloud.com

³rh3311@mail.ru

⁴agapov2794@gmail.com

Аннотация. Синтез структуры закона управления многомерной динамической системой по квадратичному критерию на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче проведен с учетом анализа пучка квадратичных форм, который обеспечивает выполнение условий трансверсальности. Это дает возможность учета динамических свойств управляемой системы при построении квазиоптимального управления. Неопределенные множители связи второго рода могут быть установлены в результате использования принципа освобожденности с учетом свойства скобок Пуассона на основе численного моделирования. Анализ результатов моделирования процесса управления двойным маятником показывает, что разработанный квазиоптимальный закон управления нелинейной динамической системой с несколькими степенями свободы позволяет получить выигрыш по показателю быстродействия при улучшении значения квадратичного критерия в сравнении с известным управлением, построенным на основе принципа декомпозиции и игрового подхода.

Ключевые слова: квазиоптимальный закон управления, система управления, многомерная нелинейная динамическая система, пучок квадратичных форм, линия переключения

Для цитирования: Зехцер В.О., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Агапов А.А. Метод синтеза нелинейных квазиоптимальных законов управления многомерными системами на основе условия максимума функции обобщенной мощности и анализа пучка квадратичных форм // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 34–42.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812>.

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

Original article

SYNTHESIS METHOD OF NONLINEAR QUASI-OPTIMAL CONTROL LAWS FOR MULTIDIMENSIONAL SYSTEMS BASED ON THE MAXIMUM CONDITION OF THE GENERALIZED POWER FUNCTION AND THE ANALYSIS OF A BEAM OF QUADRATIC FORMS

Vladimir O. Zekhtser^{1✉}, Andrey A. Kostoglotov², Sergey V. Lazarenko³, Alexandr A. Agapov⁴

^{1, 2, 3, 4} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

¹vova-zehcer@yandex.ru✉

²kostoglotov@icloud.com

³rh3311@mail.ru

⁴agapov2794@gmail.com

Abstract. The synthesis of the control law structure for multidimensional dynamic system according to a quadratic criterion based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem was carried out taking into account the analysis of a quadratic forms bundle, which ensures the fulfillment of transversality conditions. This makes it possible to take into account the dynamic properties of the controlled system when constructing quasi-optimal control. Indeterminate coupling multipliers of the second kind can be established as a result of using the principle of releasability, taking into account the property of Poisson brackets based on numerical modeling. The analysis of the modeling results of the control process of a dual pendulum shows that the developed quasi-optimal control law of a nonlinear dynamic system with several degrees of freedom results in a gain in terms of speed when improving the value of the quadratic criterion in comparison with the known control based on the principle of decomposition and the game approach.

Keywords: quasi-optimal control law, control system, multidimensional nonlinear dynamic system, beam of quadratic forms, switching line

For citation: Zekhtser V.O., Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Agapov A.A. Synthesis Method of Nonlinear Quasi-Optimal Control Laws for Multidimensional Systems Based on the Maximum Condition of the Generalized Power Function and the Analysis of a Beam of Quadratic Forms. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):34-42. (In Russ.).

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812>.

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

Введение

Рассматривается задача построения квазиоптимального управления лагранжевой системой с несколькими степенями свободы. В работах [1, 2] получены законы управления в предположении, что исходная система приведена к главным осям на основе принципа декомпозиции [3, 4]. В настоящей работе проводится прямой синтез управления с использованием анализа пучка квадратичных форм и принципа освобождаемости, что позволяет провести учет инерционных свойств многомерной системы и в отличие от работы [5] весовых коэффициентов критерия качества.

Для решения задачи управления использован подход [6], обеспечивающий редукцию задачи Лагранжа к изопериметрической с использованием асинхронного варьирования для широкого класса динамических систем, удовлетворяющих принципу Гамильтона – Остроградского. На основе условия максимума функции обобщенной мощности получено квазиоптимальное решение задачи структурного синтеза законов управления. Анализ пучка квадратичных форм в совокупности с использованием принципа освобождаемости и свойств интеграла движения дает возможность построения линии переключения и соответствующего управления с точностью до параметров.

Цель работы – повышение эффективности управления нелинейными многомерными динамическими системами.

Научная задача – разработка закона управления нелинейными многомерными динамическими системами на основе условия максимума функции обобщенной мощности с использованием анализа пучка квадратичных форм.

На примере двойного маятника показано, что синтезированные законы управления повышают быстродействие управляемой системы в сравнении с квазиоптимальным законом, полученным на основе метода декомпозиции при снижении величины квадратичного функционала качества.

Постановка задачи управления

Рассмотрим класс управляемых систем, движение которых в независимых обобщенных координатах $\mathbf{q} = \|q_s\|_{s=1}^n$ может быть описано дифференциальными уравнениями Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = u_s(t), \quad s = \overline{1, n}, t \in [t_0, t_1]. \quad (1)$$

Кинетическая энергия T каждой системы этого класса выбирается из множества положительно определенных квадратичных форм обобщенных скоростей \dot{q}_s с учетом стационарности связей [7] и удовлетворяет условиям

$$T = \frac{1}{2} \sum_{s,k=1}^n a_{sk}(q) \dot{q}_s \dot{q}_k, \quad \eta_0 \sum_{s=1}^n \dot{q}_s^2 \leq T \leq \eta_1 \sum_{s=1}^n \dot{q}_s^2, \quad \eta_{0,1} = \text{const}, \quad \eta_{0,1} \geq 0, \quad (2)$$

с непрерывно дифференцируемыми коэффициентами $a_{sk}(q)$.

Допустимые управления выбираются из множества суммируемых на любом конечном интервале функций $u(t) = \|u_s(t)\|_{s=1}^n$, принимающих значения в ограниченной замкнутой выпуклой области U

$$u(t) \in U = \{u_s(t), |u_s(t)| \leq h_s, s = \overline{1, n}\} \quad (3)$$

Задача оптимального управления заключается в переводе системы (1), (2) из начального состояния $t = t_0$, $\mathbf{q}(t_0)$, $\dot{\mathbf{q}}(t_0)$ в конечное состояние $t = t_1$, $\mathbf{q}(t_1)$, $\dot{\mathbf{q}}(t_1)$ при условии минимума целевого функционала

$$J(\mathbf{q}) = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{q}) dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $F(\mathbf{q})$ – положительно определенная выпуклая функция обобщенных координат.

Положим, что критерий качества определяется следующей целевой функцией: $F(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i q_i^2 = \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q}$, где \mathbf{K} – положительно определенная диагональная матрица; k_i – заданные весовые коэффициенты.

Рассмотрим задачу построения нелинейного управления системой (1), (2) по критерию (4) при условии (3) на множестве квазиоптимальных законов управления, полученных на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче [6].

Задача будет решаться при упрощающих предположениях, когда положительно определенную матрицу $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ кинетической энергии (2) при ее незначительных изменениях за время управления будем считать близкой к постоянной, как некоторое среднее $\overline{\mathbf{A}}$ для области управления. Если эта область достаточно мала, то на всех рассматриваемых движениях матрица $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ будет мало отличаться от $\overline{\mathbf{A}}$. Матрицу кинетической энергии в дальнейшем обозначим \mathbf{A} .

Показано [8], что принятая постановка задачи и упрощающие предположения являются естественными и выполняются для широкого класса управляемых объектов, например для манипуляционных роботов с электромеханическим приводом.

Известно [6], что решение задачи структурного синтеза закона управления имеет вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = h_s \text{sign}(\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))_s, \quad [\lambda(A - T) + F]_t^{t_1} = 0, \quad t \in [t_0, t_1], \quad s = \overline{1, n},$$

где $\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{q}_s + \frac{\partial F(\mathbf{q})}{\partial q_s}$ определяет поверхность переключения; $\mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ –

знакопостоянная синтезирующая функция; $[\lambda(A-T) + F]_t^{t_1} = 0, t \in [t_0, t_1]$, – требование выполнения энергетического баланса на экстремальной траектории; λ – множитель Лагранжа.

Тогда построение управления связано с определением линии переключения, которая задается уравнением $\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))\dot{q}_s(t) + \frac{\partial F(\mathbf{q})}{\partial q_s} = 0$ с учетом выполнения условия

$$[\lambda(A-T) + F]_t^{t_1} = 0, t \in [t_0, t_1], s = \overline{1, n}.$$

Синтез закона управления

На линии переключения работа управляющих сил $A = 0$, тогда

$$T - \lambda^{-1}F = 0. \quad (5)$$

Линия переключения проходит через терминальную точку фазового пространства, на ней управление меняет знак, и ее можно записать с учетом (5) через кинематические характеристики.

Квадратичные формы T и F определяют регулярный пучок форм

$$\mathbf{A}(\dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) - \gamma \mathbf{K}(\mathbf{q}, \mathbf{q}), \gamma = \lambda^{-1}, \quad (6)$$

с характеристическим уравнением $|\mathbf{A} - \gamma \mathbf{K}| = 0$, которое имеет n вещественных корней γ_i ($i = \overline{1, n}$) и соответствующие линейно независимые главные векторы \mathbf{z}_i ($i = \overline{1, n}$). Это требует анализа пучка квадратичных форм (6), порожденного матричным уравнением энергетического баланса (5). Главные векторы \mathbf{z}_i ($i = \overline{1, n}$) определяют главную матрицу

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_n) = \|\|z_{ij}\|\|^n. \text{ Тогда справедливо [9] } \mathbf{Z}^T \mathbf{A} \mathbf{Z} = \|\|\gamma_j \delta_{ij}\|\|^n, \mathbf{Z}^T \mathbf{K} \mathbf{Z} = \mathbf{E}.$$

Получить $\mathbf{Z} = \mathbf{P}\mathbf{O}$ можно, совершив преобразование $\mathbf{q} = \mathbf{P}\mathbf{y}$, т.е. привести $\mathbf{K}(\mathbf{q}, \mathbf{q})$ к единичной сумме, преобразовав к $\sum_{j=1}^n y_j^2$, при этом $\mathbf{A}(\dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) \rightarrow \mathbf{A}_1(\dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}})$. После этого $\mathbf{A}_1(\dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}})$ приводят к виду $\sum_{j=1}^n \gamma_j \xi_j^2$ при помощи $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{O}\dot{\xi}$ (приведение к главным осям).

Таким образом, вещественная симметричная матрица \mathbf{A}_1 может быть представлена в виде $\mathbf{A}_1 = \mathbf{O}\|\|\gamma_i \delta_{ik}\|\|^n \mathbf{O}^{-1}$. Тогда существует положительно определенная матрица

$$\mathbf{F} = \sqrt{\mathbf{A}} = \mathbf{O}\|\|\sqrt{\gamma_i} \delta_{ik}\|\|^n \mathbf{O}^{-1}, \text{ что позволяет определить кинематическую связь } \dot{\mathbf{q}} = \|\|\sqrt{\gamma_i} \delta_{ik}\|\|^n \mathbf{P}\mathbf{O}\dot{\mathbf{q}}. \text{ С}$$

учетом того, что матрица \mathbf{K} диагональная, \mathbf{P} находится тривиально $\mathbf{P} = \|\|\sqrt{k_i^{-1}}\|\|^n$. В итоге имеем

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{R}\dot{\mathbf{q}}, \quad (7)$$

где $\mathbf{R} = \|\|r_{ik}\|\|^n = \|\|\sqrt{\gamma_i k_i^{-1}} \delta_{ik}\|\|^n \mathbf{O}$. Учет кинематической связи при построении линии переключения

можно провести в соответствии с принципом освобождаемости [7], путем определения работы E сил реакции связи. Составим с учетом связей расширенный гамильтониан $H = \lambda T + F + E$.

Положим, что линия переключения $\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{q}_s + \frac{\partial F(\mathbf{q})}{\partial q_s} = 0$ является интегралом движения $u_0(\mathbf{p}, \mathbf{q})$; \mathbf{p} – обобщенный импульс. Тогда для ее определения используем свойства ско-

$$\text{бок Пуассона [10] } [H, u_0] = \sum_{s=1}^n \left[\frac{\partial H}{\partial q_s} \frac{\partial u_0}{\partial p_s} - \frac{\partial H}{\partial p_s} \frac{\partial u_0}{\partial q_s} \right] = 0.$$

Заметим, что $T = \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{A} \mathbf{q} = \mathbf{p} \mathbf{q} = \mathbf{p}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{p}$. Поскольку по определению $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{R} \mathbf{q}$ – кинематическая связь с неособенной матрицей, то $\mathbf{R}^{-1} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}$. Элементарная работа $\delta' E = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{s=1}^n r_{si}^{-1} \varepsilon_s \right) \delta q_i$, или $\delta' E = \mathbf{S} \delta \mathbf{q}$, где \mathbf{S} – вектор силы реакции связей $\mathbf{S} = \mathbf{R}^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}$; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор неопределенных множителей Лагранжа второго рода.

Тогда на линии переключения имеют место следующие соотношения:

$$u_{s0} = \mu_s \dot{q}_s + \frac{\partial F(\mathbf{q})}{\partial q_s} = \mu_s \dot{q}_s + k_s q_s = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial p_s} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial q_s} = \sum_{i=1}^n r_{si}^{-1} \varepsilon_i, \quad \frac{\partial H}{\partial q_s} = k_s q_s + \sum_{k=1}^n r_{sk}^{-1} \varepsilon_k, \quad \frac{\partial H}{\partial p_s} = \lambda \dot{q}_s,$$

$$\frac{\partial u_{s0}}{\partial p_s} = a_{ss}^{-1} \mu_s, \quad a_{ss}^{-1} - \text{элемент обратной матрицы } \mathbf{A}^{-1}, \quad \dot{q}_s = \sum_{k=1}^n a_{sa}^{-1} p_k, \quad \frac{\partial u_{s0}}{\partial q_s} = k_s.$$

$$\text{Выражение для скобок Пуассона принимает вид } [H, u_0] = \sum_{s=1}^n \left[\left(k_s q_s + \sum_{k=1}^n r_{sk}^{-1} \varepsilon_k \right) a_{ss}^{-1} \mu_s - \lambda \dot{q}_s k_s \right] = 0.$$

$$\text{Откуда имеем выражение для синтезирующей функции } \mu_s = \lambda \frac{|\dot{q}_s|}{a_{ss}^{-1} \left[|q_s| + k_s^{-1} \sum_{k=1}^n r_{sk}^{-1} \varepsilon_k \right]}.$$

Таким образом, структура квазиоптимальной управляемой системы с точностью до λ и вектора неопределенных множителей $\boldsymbol{\varepsilon}$ принимает вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial q_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = h_s \text{sign} \left[\lambda \frac{|\dot{q}_s|}{a_{ss}^{-1} \left[|q_s| + k_s^{-1} \sum_{k=1}^n r_{ks}^{-1} \varepsilon_k \right]} + k_s q_s \right]. \quad (8)$$

Моделирование

Рассмотрим задачу управления объектом с несколькими степенями свободы (двойной маятник), кинетическая энергия которого имеет вид [10]

$$T = \frac{1}{2} l_1^2 (m_1 + m_2) \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 \dot{\varphi}_2^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (9)$$

По критерию минимума функционала $J(\boldsymbol{\varphi}) = \int_{t_0}^{t_1} F(\boldsymbol{\varphi}) dt \rightarrow \min$, где $\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}$, φ_1, φ_2 – углы отклонения от нормали первого и второго маятника соответственно; m_1, m_2 – массы маятников; l_1, l_2 – длины маятников; $F = \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}$, $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$, $k_i, i = 1, 2$, – заданные весовые коэффициенты.

Управления ограничены $|u_1| < h_1$, $|u_2| < h_2$ и представляют собой моменты сил, приложенные в точках подвеса. Матрица кинетической энергии (9) имеет вид

$$T = \dot{\boldsymbol{\varphi}}^T \mathbf{A} \dot{\boldsymbol{\varphi}},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} l_1^2 (m_1 + m_2) & \frac{m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} \\ \frac{m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} & \frac{1}{2} m_2 l_2^2 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим случай малых углов φ_1, φ_2 ; $m_1 = m_2 = 1$; $l_1 = l_2 = 1$. Тогда $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \rightarrow 1$ и компоненты матрицы кинетической энергии имеют следующие значения:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Уравнения движения двойного маятника, разрешенные относительно старшей производной, имеют вид

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 = \frac{g}{l}(\varphi_2 - 2\varphi_1) + u_1, \\ \ddot{\varphi}_2 = 2\frac{g}{l}(\varphi_1 - \varphi_2) + u_2, \end{cases} \quad (11)$$

с начальными $(\varphi_1(0) = 0,5, \dot{\varphi}_1(0) = 0, \varphi_2(0) = 0, \dot{\varphi}_2(0) = 0)$ и конечными $(\varphi_1(0) = 0, \dot{\varphi}_1(0) = 0, \varphi_2(0) = 0, \dot{\varphi}_2(0) = 0)$ условиями.

Для синтеза управления по предложенному методу необходимо определить структуру кинематических связей $\dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{R}\boldsymbol{\varphi}$.

Положим $k_1 = 0,1, k_2 = 0,9$, тогда

$$F = \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Найдем главную матрицу \mathbf{Z} пучка квадратичных форм $\dot{\boldsymbol{\varphi}}^T \mathbf{A}\dot{\boldsymbol{\varphi}} - \lambda \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = 0, |\mathbf{A} - \lambda \mathbf{K}| = 0$.

Выполним преобразования переменных $\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{P}\mathbf{y}, \dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{P}\dot{\mathbf{y}}$, приводящие форму $\mathbf{K}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\varphi})$ к еди-

ничной $\boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{I}\boldsymbol{\varphi}$: $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{k_1}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{k_2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,162 & 0 \\ 0 & 1,054 \end{bmatrix}$.

Тогда \mathbf{A} переходит в $\mathbf{A}_1 = \mathbf{P}^T \mathbf{A}\mathbf{P}$: $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 3,162 & 0 \\ 0 & 1,054 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3,162 & 0 \\ 0 & 1,054 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,998 & 1,666 \\ 1,666 & 0,555 \end{bmatrix}$.

Приведем $\mathbf{A}_1(\mathbf{y}, \mathbf{y})$ к главным осям $\mathbf{O}^{-1} \mathbf{A}_1 \mathbf{O} = \|\lambda_i \delta_{ik}\|_1^n, \mathbf{O}^{-1} \mathbf{O} = \mathbf{E}, \mathbf{O} = [v_1, v_2] = \begin{bmatrix} -0,171 & 5,838 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$,

где собственные числа и соответствующие им собственные векторы $\lambda_1 = 0,27, \lambda_2 = 10,284$,

$$v_1 = \begin{bmatrix} -0,171 \\ 1 \end{bmatrix}, v_2 = \begin{bmatrix} -5,838 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, главную матрицу \mathbf{Z} пучка (12) определяет преобразование $\mathbf{Z} = \mathbf{P}\mathbf{O}$,

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 3,162 & 0 \\ 0 & 1,054 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,171 & 5,838 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,541 & 18,46 \\ 1,054 & 1,054 \end{bmatrix}.$$

Имеем следующую структуру кинематической связи:

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}} = \|\sqrt{\lambda_i} \delta_{ik}\|_1^n \mathbf{Z}\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{R}\boldsymbol{\varphi}. \quad (13)$$

Матрица \mathbf{R} кинематической связи (13), матрицы (10), (12) позволяют определить параметры управления:

$$\begin{cases} u_1(\varphi_1, \dot{\varphi}_1) = h_1 \operatorname{sign} \left[\lambda \frac{|\dot{\varphi}_1| \varphi_1}{a_{11}^{-1} \left[|\varphi_1| + k_1^{-1} \sum_{i=1}^2 r_{1i}^{-1} \varepsilon_i \right]} + k_1 \varphi_1 \right], \\ u_2(\varphi_2, \dot{\varphi}_2) = h_2 \operatorname{sign} \left[\lambda \frac{|\dot{\varphi}_2| \varphi_2}{a_{22}^{-1} \left[|\varphi_2| + k_2^{-1} \sum_{i=1}^2 r_{2i}^{-1} \varepsilon_i \right]} + k_2 \varphi_2 \right], \end{cases} \quad (14)$$

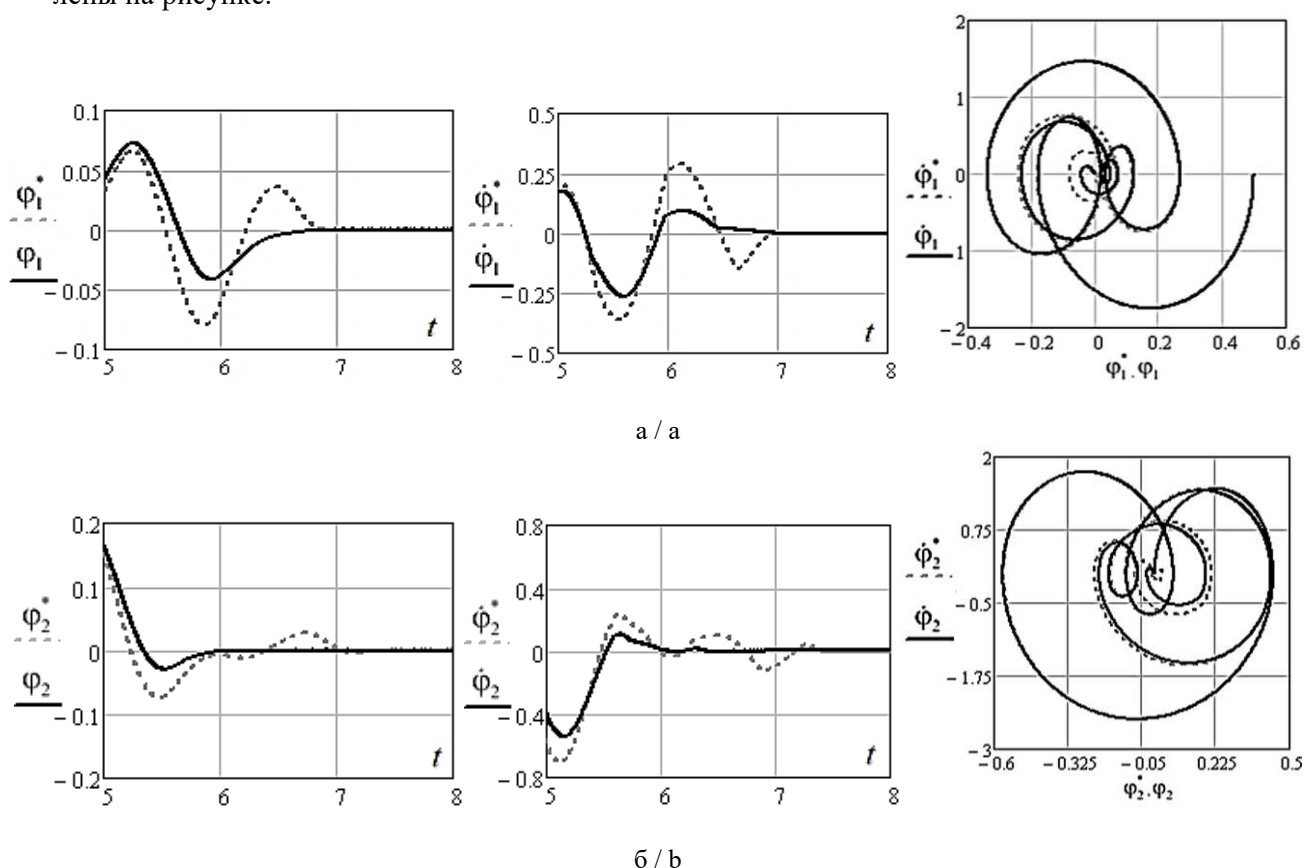
где r_{si}^{-1} – элементы матрицы \mathbf{R}^{-1} ; a_{11}^{-1} – элементы матрицы \mathbf{A}^{-1} ; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – неопределенные множители Лагранжа второго рода.

Проведем анализ эффективности синтезированных управлений (14) в сравнении с известным законом управления, построенным на основе метода декомпозиции [3]:

$$u_1^*(\varphi_1, \dot{\varphi}_1) = h_1 \operatorname{sign} \left[\frac{|\dot{\varphi}_1^*| \dot{\varphi}_1^*}{2 \cdot h_1 (1 - \rho_1)} + \varphi_1^* \right], \quad u_2^*(\varphi_2, \dot{\varphi}_2) = h_2 \operatorname{sign} \left[\frac{|\dot{\varphi}_2^*| \dot{\varphi}_2^*}{2 \cdot h_2 (1 - \rho_2)} + \varphi_2^* \right], \quad (15)$$

где $\rho_1 = \frac{\max \left[\frac{g}{l} (\varphi_2 - 2\varphi_1) \right]}{h_1}$, $\rho_2 = \frac{\max \left[\frac{g}{l} (\varphi_1 - \varphi_2) \right]}{h_2}$ определяются как ресурсы управления в сравнении с потенциальными силами, действующими в системе.

Проведем моделирование системы (11) с управлениями (14), (15) при $h_1 = h_2 = 0,5$, $\rho_1 = 0,55$, $\rho_2 = 0,65$, шаг дискретизации $\Delta t = 0001$ с. Окрестность достижения терминальной точки определена параметрами $\delta_1 = 0,001$, $\delta_2 = 0,001$. Результаты моделирования представлены на рисунке.



Переходные процессы в управляемой системе и фазовая диаграмма, звездочкой обозначены решения метода декомпозиции: а – $\varphi_1(t)$; б – $\varphi_2(t)$ / Transient processes in a controlled system and phase diagram, solutions are indicated with an asterisk decomposition method: а - $\varphi_1(t)$; б - $\varphi_2(t)$

Заключение

Результаты исследований позволяют сделать заключение, что анализ пучка квадратичных форм (5) дает возможность установить кинематическую связь (7) с точностью до неопределенных множителей Лагранжа второго рода, которая определяет вид синтезирующей функции и соответствующую структуру квазиоптимальной управляемой системы (8).

Анализ результатов моделирования процесса управления двойным маятником показывает, что синтезированный квазиоптимальный закон управления нелинейной многомерной динамической системой (14) позволяет получить выигрыш по показателю быстродействия на 6,95 % при незначительном улучшении квадратичного функционала на 0,2 % в сравнении с известным решением.

Список источников

1. Агапов А.А., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2023. № 1 (89). С. 126–135.
2. Костоглотов А.А., Агапов А.А., Лященко З.В., Лазаренко С.В. Синтез нелинейных систем при воздействии ограниченных возмущений с использованием многорежимных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2022. Т. 20, № 1–2. С. 37–47.
3. Пятницкий Е.С. Принцип декомпозиции в управлении механическими системами // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300, № 2. С. 300–303.
4. Черноусько Ф.Л. Декомпозиция управления динамической системой // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314, № 4. С. 801–805.
5. Агапов А.А., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Синтез квазиоптимального закона управления на основе построения линии переключения с учетом анализа пучка квадратичных форм в составе интеллектуальной транспортной системы // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2022. № 1 (85). С. 177–185.
6. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2021. Т. 6, № 6. С. 3–12.
7. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
8. Черноусько Ф.Л. Декомпозиция и синтез управления в нелинейных динамических системах // Оптимальное управление и дифференциальные уравнения : сб. ст. к 70-летию со дня рождения академика Е.Ф. Мищенко. М.: Наука, Физматлит, 1995. Т. 211. С. 457–472.
9. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц : учеб. пособие. М.: Физматлит, 2010. 560 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20246076> (дата обращения: 20.10.2021).
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 1: Механика. 4-е изд. М.: Наука, 1988. 216 с.

References

1. Agapov A.A., Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. Analysis of the effectiveness of quasi-optimal control laws using the fuzzy logic apparatus in the problems of transport systems intellectualization. *Vestn. Rostovskogo gos. un-ta putei soobshcheniya = Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2023;(1):126-135. (In Russ.).
2. Kostoglotov A.A., Agapov A.A., Lyashchenko Z.V., Lazarenko S.V. Synthesis of nonlinear systems under the influence of limited disturbances using multimode control laws based on the condition of the maximum of the generalized power function. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-Measuring and Control Systems*. 2022;20(1-2):37-47. (In Russ.).
3. Pyatnitsky E.S. The principle of decomposition in the management of mechanical systems. *Dokl. AN SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1988;300(2):300-303. (In Russ.).
4. Chernousko F.L. Decomposition of dynamic system control. *Dokl. AN SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1990;314(4):801-805. (In Russ.).
5. Agapov A.A., Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. Synthesis of a quasi-optimal control law based on the construction of a switching line, taking into account the analysis of a bunch of quadratic forms as part of an intelligent transport system. *Vestn. Rostovskogo gos. un-ta putei soobshcheniya = Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2022;(1):177-185. (In Russ.).
6. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. The method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*. 2021;6(6):3-12. (In Russ.).
7. Lurie A.I. *Analytical mechanics*. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1961. 824 p. (In Russ.).

8. Chernousko F.L. Decomposition and synthesis of control in non-linear dynamic systems. *Optimal control and differential equations*. Collection of articles to the 70th anniversary of the birth of Academician E.F. Mishchenko. Moscow: Nauka, Fizmatlit Publ.; 1995;211:457-472. (In Russ.).

9. Gantmacher F.R. *Theory of matrices*. Textbook. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2010. 560 p. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20246076> [Accessed 20th October 2021]. (In Russ.).

10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics. Vol. 1: Mechanics*. Moscow: Nauka Publ.; 1988. 216 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В.О. Зехцер – младший научный сотрудник, кафедра связи на железнодорожном транспорте.

А.А. Костоглотов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой связи на железнодорожном транспорте.

С.В. Лазаренко – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, кафедра связи на железнодорожном транспорте.

А.А. Агапов – ассистент, кафедра вычислительной техники и автоматизированных систем управления.

Information about the authors

V.O. Zekhtser - Junior Researcher, Department of Communication on Railway Transport.

A.A. Kostoglotov - Doctor of Science (Technical Science), Professor, Head of the Department of the Communication on Railway Transport.

S.V. Lazarenko - Candidate of Science (Technical Science), Associate Professor, Senior Researcher, Department of the Communication on Railway Transport.

A.A. Agapov – Assistant, Department of the Computing Machinery and Computerized Control Systems.

*Статья поступила в редакцию 14.05.2023; одобрена после рецензирования 16.06.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 14.05.2023; approved after reviewing 16.06.2023; accepted for publication 30.10.2023.*

Научная статья

УДК 532.5

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-43-54

ЗАРОЖДЕНИЕ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ НА ГРАНИЦЕ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ЕГО ОБТЕКАНИИ ПОТОКОМ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Межлум Альбертович Сумбатян^{1✉}, *Рафаэл Михайлович Закарян*²

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

¹ masumbatyan@srfedu.ru[✉]

² zak.rafik@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача о зарождении вихреобразования на поверхности кругового цилиндра при его обтекании потоком несжимаемой вязкой жидкости. Для исследования данного процесса формулируется новый итерационный по времени подход решения 2D-задачи об обтекании круга на основе метода граничных интегральных уравнений с функциями Грина для внешней части цилиндра и с краевым условием Дирихле на его поверхности. Новый подход, на базе нестационарного уравнения Навье – Стокса в переменных функция тока – вихрь, используя классические методы теории потенциала и метода граничных элементов, позволяет получить полную систему из трех интегральных уравнений, которые определяют поля функций тока и завихренности на новом шаге по времени, если известны эти поля на предыдущем шаге. Предположение о начальном невозбужденном состоянии потока (функция завихренности во всей области потока равна нулю) дает возможность на первом шаге итерации по времени получить аналитическое решение. Анализ картины полученного решения в зависимости от величины временного шага позволяет сформулировать гипотезу о характере зарождения вихреобразования на поверхности кругового цилиндра при его обтекании потоком несжимаемой вязкой жидкости. Полученная картина описывает возникновение на поверхности цилиндра двух обобщенных вихрей, обладающих бесконечно большой интенсивностью и бесконечно малой локализацией вблизи поверхности цилиндра, которые «мгновенно» отрываются от поверхности цилиндра со значительным уменьшением интенсивности, но с большим охватом обтекающего цилиндра потока.

Ключевые слова: вязкая жидкость, граничное интегральное уравнение, функция тока, функция завихренности, зарождение вихреобразования

Для цитирования: Сумбатян М.А., Закарян Р.М. Зарождение вихреобразования на границе кругового цилиндра при его обтекании потоком вязкой жидкости // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 43–54.

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

Original article

ORIGIN OF VORTEX FORMATION AT THE BOUNDARY OF A CIRCULAR CYLINDER IN A FLOW OF VISCOUS FLUID

Mezhlum A. Sumbatyan^{1✉}, *Rafael M. Zakaryan*²

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

¹ masumbatyan@srfedu.ru[✉]

² zak.rafik@gmail.com

© Сумбатян М.А., Закарян Р.М., 2023

Abstract. The paper considers the problem of the generation of vortex formation on the surface of a circular cylinder placed in a flow of incompressible viscous fluid. To study this process, a new time-iterative approach is formulated for solving the 2D problem of flow around the circle based on the BIE method with Green's functions for the outer part of the cylinder with the Dirichlet boundary condition on its surface. A new approach, based on the transient Navier-Stokes equation in the variables stream function - vortex, using classical methods of potential theory and the boundary element method, allows us to obtain a complete system of three integral equations that determine the fields of stream functions and vorticity at a new time step, if these fields are known from the previous step. The assumption about the initial unexcited state of the flow (the vorticity function in the entire flow region is zero) allows us to obtain an analytical solution at the first time iteration step. The analysis of the obtained solution depending on the time step allows us to formulate a hypothesis about the nature of the generation of vortex formation on the surface of the circular cylinder in a flow of incompressible viscous fluid. The results obtained describe the appearance on the surface of the cylinder of two generalized vortices, having infinitely high intensity and infinitely small localization near the surface of the cylinder, which "instantly" break away from the surface of the cylinder, with a significant decrease in intensity, but with a large coverage of the flow around the cylinder.

Keywords: viscous fluid, boundary integral equation, stream function, vorticity function, vortex initiation

For citation: Sumbatyan M.A., Zakaryan R.M. Origin of Vortex Formation at the Boundary of a Circular Cylinder in a Flow of Viscous Fluid. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):43-54. (In Russ.).

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

Введение

Вихреобразование изучается в различных разделах физики – от динамики жидкости [1] до квантовой физики [2]. В области динамики жидкости большое внимание уделяется вихреобразованию в океане [3] и атмосфере [4]. Считается, что оно вносит основной вклад в экологическую обстановку на планете Земля. Вихреобразование также существенно влияет на функционирование технических систем, в которых возникают потоки жидкости и газа [5]. Это явление во многом определяет лобовое сопротивление обтекаемого тела, подъемную силу крыла и аэродинамический шум [6–8]. Поэтому изучение процесса зарождения вихрей в потоке жидкости и газа, их развитие и взаимодействие – актуальная задача.

Большой вклад в изучение процесса вихреобразования при поперечном обтекании кругового цилиндра внесли экспериментальные исследования [9–11]. Согласно им, в зависимости от диапазона значений числа Рейнольдса выделяют три режима обтекания «бесконечного» цилиндра: ламинарный (докритический), переходный (критический и закритический) и турбулентный (транскритический). Особое внимание стоит уделить переходному режиму, так как именно в этот момент происходит зарождение вихреобразования. Однако такого феноменологического подхода недостаточно, чтобы понять суть явления. Необходимо установить связь между натурным экспериментом и теорией.

Это в рамках динамики вязкой жидкости сопряжено со сложностью уравнений Навье – Стокса, которые пока невозможно решить аналитически. Современные методы их решения опираются на методы численного моделирования (конечных элементов [12] и конечных объемов [13]). В рамках данных методов формируются различные технологии расчетов: RANS, LES, DES, DNS [14–17]. При их использовании большое внимание уделяется построению сеток, которые могут, например, адаптивно перестраиваться (дробиться) [18] или деформироваться (менять свою форму) [19], а также выбору разностных схем, желателен высокий порядок, способам усреднения и фильтрации данных. При этом усилия скорее направлены не на выявление природы вихреобразования, а на разрешение структур в потоке, которые идентифицируются как крупные и/или мелкие вихри.

Метод граничных интегральных уравнений (ГИУ), который применяется в настоящей работе, используется для вязких жидкостей менее широко, так как при этом основные уравнения Навье – Стокса являются сильно нелинейными. Среди прочих отметим работы [20–23]. Несмотря на то что в итоге к полученным интегральным уравнениям применяются также различные численные методы, метод ГИУ лучше подходит к описанию явления вихреобразования. Это объясняется тем, что часто в интегральных уравнениях возникают обобщенные, специальные функции, кото-

рые лучше приспособлены к описанию разрывов и сингулярностей, возникающих при подобных процессах. Кроме того, анализ интегральных уравнений, полученных в рамках разработки нового подхода к решению 2D-задачи обтекания тел потоком вязкой жидкости на основе метода ГИУ, показывает, что структура решения формируется в виде сингулярных вихрей, которые лавинообразно с каждой итерацией по времени формируются на поверхности обтекаемого тела.

Постановка решения задачи как итерационного процесса по времени

Рассмотрим 2D-задачу поперечного обтекания бесконечного круглого цилиндра потоком вязкой несжимаемой жидкости (рис. 1). Запишем уравнение Навье – Стокса в терминах функции тока ψ и функции завихренности ω , а также уравнение их взаимосвязи [24–26]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega_f}{\partial t} = -v_{f1} \frac{\partial \omega_f}{\partial x_1} - v_{f2} \frac{\partial \omega_f}{\partial x_2} + \nu \Delta \omega_f \\ v_{f1} = \frac{\partial \psi_f}{\partial x_2}, v_{f2} = -\frac{\partial \psi_f}{\partial x_1}, \omega_f = \frac{\partial v_{f1}}{\partial x_2} - \frac{\partial v_{f2}}{\partial x_1}, \Delta \psi_f = \omega_f, \\ v_{f1} = v_0 + u_1, v_{f2} = v_2, \psi_f = \psi_0 + \psi, \omega_f = \omega, \psi_0 = v_0 x_2 \end{cases} \quad (1)$$

где нижний индекс f означает полную величину в потоке, которая представляется в виде суммы величины набегающего потока с индексом 0 и величины возмущения без индекса. Здесь v_{f1} и v_{f2} – компоненты вектора скорости. Заметим, что давление исключено из системы (1).

Итерационный алгоритм решения задачи построим следующим образом. В уравнении Навье – Стокса нестационарный член при численном решении аппроксимируется неявной схемой Эйлера «назад»: $(\partial \omega / \partial t)_n \approx (\omega_n - \omega_{n-1}) / \tau$, где τ – выбранный шаг по времени, а конвективные члены этого уравнения будем брать на «предыдущем» временном слое, чтобы избежать нелинейной краевой задачи на каждой итерации по времени. Физические величины, относящиеся к текущему временному слою, будем обозначать с нижним или верхним индексом n .

Такой подход дает систему, состоящую из двух эллиптических уравнений в частных производных относительно функций ω_n и ψ_n :

$$\begin{cases} \omega_f^n - \varepsilon \Delta \omega_f^n = g_f^{n-1} \rightarrow \Delta \omega_f^n - k^2 \omega_f^n = -\frac{g_f^{n-1}}{\varepsilon} \\ g_f^{n-1} = \omega_f^{n-1} + \tau \left(\frac{\partial \psi_f}{\partial x_1} \frac{\partial \omega_f}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi_f}{\partial x_2} \frac{\partial \omega_f}{\partial x_1} \right)_{n-1} \\ \Delta \psi_f^n = \omega_f^n, (\varepsilon = \nu \tau, k^2 = 1 / \varepsilon) \end{cases} \quad (2)$$

Добавим к полученной системе уравнений (2) граничные условия непротекания и непроскальзывания потока вязкой жидкости на поверхности цилиндра, которые можно записать для функции тока в виде

$$\begin{cases} \psi_f^n(x)|_l = 0, \Rightarrow \psi_n(x)|_l = -\psi_0(x)|_l \\ \left. \frac{\partial \psi_f^n(x)}{\partial n_x} \right|_l = 0, \Rightarrow \left. \frac{\partial \psi_n(x)}{\partial n_x} \right|_l = -\left. \frac{\partial \psi_0(x)}{\partial n_x} \right|_l \end{cases} \quad (3)$$

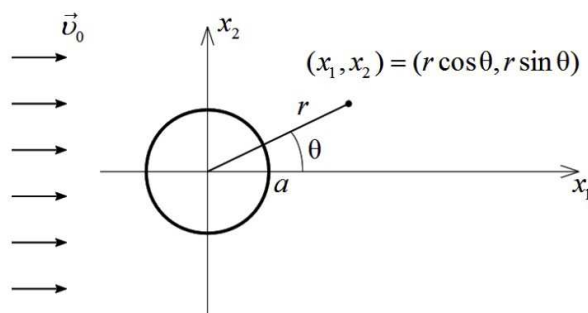


Рис. 1. Схема обтекания круглого цилиндра радиусом a / Fig. 1. A draft of the stream around a cylinder of radius a

Система уравнений (2) и граничные условия (3) позволяют на каждом шаге итерации по времени в результате решения двух линейных эллиптических краевых задач определить значения функции тока ψ_n и функции завихренности ω_n на новом временном слое n , если известно их значение на предыдущем $(n - 1)$ временном слое.

Получившиеся краевые задачи удобно решить методом ГИУ. Для этого стандартными методами классической теории потенциала [20, 27] два эллиптических уравнения в частных производных (2) преобразуются в следующие интегральные представления для функций ω_n и ψ_n :

$$\omega_n(x) = \int_l \left[\frac{\partial G_\omega(y, x)}{\partial n_y} \omega_n(y) - G_\omega(y, x) \frac{\partial \omega_n(y)}{\partial n_y} \right] dl_y + \frac{1}{\varepsilon} \iint_S G_\omega(y, x) g_f^{n-1} ds_y, \quad (4)$$

$$\psi_n(x) = \int_l \left[\frac{\partial G_\psi(y, x)}{\partial n_y} \psi_f^n(y) - G_\psi(y, x) \frac{\partial \psi_f^n(y)}{\partial n_y} \right] dl_y - \iint_S G_\psi(y, x) \omega_n(y) ds_y \quad (5)$$

для любой выбранной точки $x = (x_1, x_2)$ в потоке. Здесь S – область, занимаемая жидкостью, т.е. внешняя часть цилиндра; l – граничная линия окружности; dl_y – длина элементарной дуги на граничной линии; ds_y – элементарная площадь в жидкости; n_y – единичная нормаль к l , направленная от границы внутрь жидкости (т.е. снаружи цилиндра). Индекс y означает, что элементарные величины берутся в точке $y = (y_1, y_2)$, а не в точке x .

Если переименовать переменные в уравнении (4) соответствующим образом, например $(x, y) \rightarrow (y, \eta)$, подставить это уравнение в интеграл по всей области потока уравнения (5) и воспользоваться граничными условиями (3), то можно получить два или одно ГИУ. Количество ГИУ будет определяться способом построения функций Грина уравнения Гельмгольца для функции завихренности и уравнения Лапласа для функции тока.

Полученные таким образом ГИУ вместе с уравнениями (4) и (5) составляют полную систему уравнений, в рамках которой формируется итерационный процесс по времени решения поставленной задачи на основе метода ГИУ.

Построение специальных функций Грина

Построим специальные функции Грина уравнений Пуассона и Гельмгольца для внешней части цилиндра. Они удовлетворяют однородному краевому условию Дирихле на границе обтекаемого тела [28].

Перейдем в полярную систему координат:

$$\begin{aligned} x &= (x_1, x_2) = (r_0 \cos \theta_0, r_0 \sin \theta_0), \\ y &= (y_1, y_2) = (r \cos \theta, r \sin \theta), \\ \eta &= (\eta_1, \eta_2) = (\rho \cos \beta, \rho \sin \beta). \end{aligned} \quad (6)$$

Запишем уравнения Пуассона и Гельмгольца для определения соответствующих функций Грина в полярной системе координат:

$$\frac{\partial^2 G_\psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_\psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 G_\psi}{\partial \theta^2} = -\frac{\delta(r-r_0)\delta(\theta-\theta_0)}{r}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 G_\omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_\omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 G_\omega}{\partial \theta^2} - k^2 G_\omega = -\frac{\delta(r-r_0)\delta(\theta-\theta_0)}{r}. \quad (8)$$

Функции $G_\psi = G_\psi(y, x) = G_\psi(r, \theta; r_0, \theta_0)$ и $G_\omega = G_\omega(y, x) = G_\omega(r, \theta; r_0, \theta_0)$ рассматриваются как функции $y = (r, \theta)$ для любой фиксированной точки $x = (r_0, \theta_0)$ жидкости с граничным условием $G_\psi|_{r=a} = 0$ и $G_\omega|_{r=a} = 0$, где a – радиус цилиндра. Согласно [28],

$$\delta(\theta - \theta_0) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=0}^{\infty} a_m \cos[m(\theta - \theta_0)], \quad a_0 = 1, a_m = 2 \quad (m \geq 1).$$

Тогда G_ψ и G_ω в силу ортогональности тригонометрических функций можно искать в виде

$$G_\psi = \sum_{m=0}^{\infty} G_m^\psi(r, r_0) \cos[m(\theta - \theta_0)], \quad (9)$$

$$G_\omega = \sum_{m=0}^{\infty} G_m^\omega(r, r_0) \cos[m(\theta - \theta_0)]. \quad (10)$$

Теперь уравнения (7) и (8) сводятся к неоднородным обыкновенным дифференциальным уравнениям (ОДУ) второго порядка:

$$\frac{\partial^2 G_m^\psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_m^\psi}{\partial r} - \frac{m^2}{r^2} G_m^\psi = -a_m \frac{\delta(r-r_0)}{2\pi r}, \quad \frac{\partial^2 G_m^\omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_m^\omega}{\partial r} - \left(\frac{m^2}{r^2} + k^2 \right) G_m^\omega = -a_m \frac{\delta(r-r_0)}{2\pi r},$$

решение которых, ограниченное на бесконечности и удовлетворяющее граничному условию $G_m^\psi(a) = 0$ и $G_m^\omega(a) = 0$, можно построить в виде [28]

$$G_m^\psi(r, r_0) = \frac{1}{2\pi m} \left[- \left(\frac{a^2}{r_0 r} \right)^m + H(r-r_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)^m + H(r_0-r) \left(\frac{r}{r_0} \right)^m \right] \quad (m \geq 1),$$

$$G_0^\psi(r, r_0) = \frac{1}{2\pi} \left[H(r-r_0) \ln \frac{r_0}{a} + H(r_0-r) \ln \frac{r}{a} \right], \quad (11)$$

$$G_m^\omega(r, r_0) = \frac{a_m}{2\pi} \left[- \frac{K_m(kr_0)}{K_m(ka)} K_m(kr) I_m(ka) + H(r-r_0) K_m(kr) I_m(kr_0) + \right. \\ \left. + H(r_0-r) I_m(kr) K_m(kr_0) \right] \quad (m \geq 0). \quad (12)$$

Вывод основного ГИУ для функции завихренности на основе специальных функций Грина

Интегральные представления (4) и (5) с учетом одного из двух граничных условий (3), а именно $\psi_f^n|_l = 0$, и граничных свойств построенных функций Грина в полярной системе координат (6) примут вид

$$\omega_n(r_0, \theta_0) = \int_0^{2\pi} \frac{\partial G_\omega(a, \theta; r_0, \theta_0)}{\partial r} \omega_n(a, \theta) a d\theta + \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{2\pi} \int_a^\infty G_\omega(r, \theta; r_0, \theta_0) g_f^{n-1}(r, \theta) r dr d\theta, \quad (13)$$

$$\psi_n(r_0, \theta_0) = - \int_0^{2\pi} \int_a^\infty G_\psi(r, \theta; r_0, \theta_0) \omega_n(r, \theta) r dr d\theta. \quad (14)$$

В уравнении (13), опираясь на (6), сделаем переобозначение переменных: $(r_0, \theta_0) \rightarrow (r, \theta)$ и $(r, \theta) \rightarrow (\rho, \beta)$. Полученное интегральное представление для ω_n подставим в уравнение (14) и с учетом (9) и (10) получим

$$\psi_n(r_0, \theta_0) = - \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_a^\infty \left(\sum_{m=0}^\infty G_m^\psi(r, r_0) \cos[m(\theta - \theta_0)] \right) \times \left(\sum_{q=0}^\infty \frac{\partial G_q^\omega(a, r)}{\partial \rho} \cos[q(\beta - \theta)] \right) r dr d\theta \omega_n(a, \beta) a d\beta - \\ - \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_a^\infty \left(\sum_{m=0}^\infty G_m^\psi(r, r_0) \cos[m(\theta - \theta_0)] \right) \times \left(\sum_{q=0}^\infty G_q^\omega(\rho, r) \cos[q(\beta - \theta)] \right) r dr d\theta g_f^{n-1}(\rho, \beta) \rho d\rho d\beta. \quad (15)$$

С учетом ортогональности тригонометрических функций интегрирование по переменной θ существенно упрощает уравнение (15):

$$\psi_n(r_0, \theta_0) = -\pi a \sum_{m=0}^\infty b_m \int_0^{2\pi} \int_a^\infty G_m^\psi(r, r_0) \frac{\partial G_m^\omega(a, r)}{\partial \rho} r dr \times \omega_n(a, \beta) \cos[m(\beta - \theta_0)] d\beta - \\ - \frac{\pi}{\varepsilon} \sum_{m=0}^\infty b_m \int_0^{2\pi} \int_a^\infty G_m^\psi(r, r_0) G_m^\omega(\rho, r) r dr \times g_f^{n-1}(\rho, \beta) \cos[m(\beta - \theta_0)] \rho d\rho d\beta, \quad (16)$$

где $b_0 = 2$, $b_m = 1$ ($m \geq 1$).

Так как первое граничное условие было уже использовано, то для вывода ГИУ для нахождения граничного значения завихренности ω будем использовать оставшееся условие $\partial\psi_f(y)/\partial n_y = 0$, $y \in l$. Выражение для нормальной производной от функции тока, поскольку нормаль к круглому цилиндру направлена по радиусу, имеет вид

$$\frac{\partial \psi_n(a, \theta_0)}{\partial r_0} = -\pi a \sum_{m=0}^{\infty} b_m \int_0^{2\pi} \left[\int_a^{\infty} \frac{\partial G_m^\psi(r, a)}{\partial r_0} \frac{\partial G_m^\omega(a, r)}{\partial \rho} r dr \right] \times \omega_n(a, \beta) \cos[m(\beta - \theta_0)] d\beta -$$

$$-\frac{\pi}{\varepsilon} \sum_{m=0}^{\infty} b_m \int_0^{2\pi} \left[\int_a^{\infty} \frac{\partial G_m^\psi(r, a)}{\partial r_0} G_m^\omega(\rho, r) r dr \right] \times g_f^{n-1}(\rho, \beta) \cos[m(\beta - \theta_0)] \rho d\rho d\beta. \quad (17)$$

Упростим выражение (17). Вычислим некоторые члены последней формулы в явном виде, используя равенство [29]: $I_m(z)K'_m(z) - K_m(z)I'_m(z) = -1/z$:

$$\frac{\partial G_0^\psi(r, a)}{\partial r_0} = \frac{\partial G_0^\psi(r, r_0)}{\partial r_0} \Big|_{r_0 \rightarrow a} = \frac{1}{2\pi a}, \quad \frac{\partial G_m^\psi(r, a)}{\partial r_0} = \frac{\partial G_m^\psi(r, r_0)}{\partial r_0} \Big|_{r_0 \rightarrow a} = \frac{1}{\pi a} \left(\frac{a}{r} \right)^m, \quad (18)$$

$$\frac{\partial G_m^\omega(a, r)}{\partial \rho} = \frac{\partial G_m^\omega(\rho, r)}{\partial \rho} \Big|_{\rho \rightarrow a} = \frac{a_m}{4\pi a} \frac{K_m(kr)}{K_m(ka)}. \quad (19)$$

Далее, применяя формулы (18) и (19), можно вычислить два полубесконечных интеграла по переменной r из формулы (16) в явном виде:

$$\int_a^{\infty} \frac{\partial G_m^\psi(r, a)}{\partial r_0} G_m^\omega(\rho, r) r dr = \frac{\varepsilon a_m}{2\pi^2 a} \left[\left(\frac{a}{\rho} \right)^m - \frac{K_m(k\rho)}{K_m(ka)} \right], \quad m \geq 1,$$

$$\int_a^{\infty} \frac{\partial G_0^\psi(r, a)}{\partial r_0} G_0^\omega(\rho, r) r dr = \frac{a_0 \varepsilon}{4\pi^2 a} \left[1 - \frac{K_0(k\rho)}{K_0(ka)} \right], \quad (20)$$

$$\int_a^{\infty} \frac{\partial G_m^\psi(r, a)}{\partial r_0} \frac{\partial G_m^\omega(a, r)}{\partial \rho} r dr = \frac{a_m \sqrt{\varepsilon}}{2\pi^2 a} \frac{K_{m-1}(ka)}{K_m(ka)}, \quad m \geq 1,$$

$$\int_a^{\infty} \frac{\partial G_0^\psi(r, a)}{\partial r_0} \frac{\partial G_0^\omega(a, r)}{\partial \rho} r dr = \frac{a_0 \sqrt{\varepsilon}}{4\pi^2 a} \frac{K_1(ka)}{K_0(ka)}.$$

При выводе формул (20) использованы табличные интегралы [27]: $\int K_m(z) z^{1-m} dz = -z^{1-m} K_{m-1}(z)$, $\int I_m(z) z^{1-m} dz = z^{1-m} I_{m-1}(z)$, а также известные равенства: $K_m(z)I_{m-1}(z) + I_m(z)K_{m-1}(z) = 1/z$, $K_{-m}(z) = K_m(z)$.

С учетом формул (20) формула (17) примет вид

$$\frac{\partial \psi_n(a, \theta_0)}{\partial r_0} = - \int_0^{2\pi} K(\beta - \theta_0) \omega_n(a, \beta) d\beta - \int_0^{2\pi} \int_a^{\infty} K_g(\rho, \beta - \theta_0) g_f^{n-1}(\rho, \beta) \rho d\rho d\beta, \quad (21)$$

где

$$K(\beta - \theta_0) = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{2\pi} \sum_{m=0}^{\infty} a_m \frac{K_{m-1}(ka)}{K_m(ka)} \cos[m(\beta - \theta_0)], \quad (22)$$

$$K_g(\rho, \beta - \theta_0) = \frac{1}{2\pi a} \sum_{m=0}^{\infty} a_m \left[\left(\frac{a}{\rho} \right)^m - \frac{K_m(k\rho)}{K_m(ka)} \right] \cos[m(\beta - \theta_0)].$$

Принимая во внимание, что $\psi_0 = v_0 \cdot x_2 = v_0 r_0 \sin \theta_0$, и удовлетворяя граничному условию $\partial \psi_n(a, \theta_0) / \partial r_0 = -\partial \psi_0(a, \theta_0) / \partial r_0 = -v_0 \sin \theta_0$, по формуле (21) приходим к основному ГИУ первого рода для граничного значения функции завихренности на каждом шаге итерации по времени ($0 \leq \theta_0 \leq 2\pi$):

$$\int_0^{2\pi} K(\beta - \theta_0) \omega_n(a, \beta) d\beta = v_0 \sin \theta_0 - \int_0^{2\pi} \int_a^{\infty} K_g(\rho, \beta - \theta_0) g_f^{n-1}(\rho, \beta) \rho d\rho d\beta. \quad (23)$$

Как только граничное значение $\omega_n(a, \beta)$ найдено, функции тока и завихренности легко определяются во всем объеме, занимаемом потоком жидкости, – по уравнениям (16) и (13) соответственно.

Аналитическое решение на первом временном шаге

Система интегральных уравнений, состоящая из формул (23), (13) и (16), позволяет реализовать итерационный процесс по времени решения задачи обтекания круглого цилиндра потоком вязкой жидкости.

Предположим, что в начальный момент времени поток является невозмущенным, т.е. во всем пространстве:

$$\omega_0 = 0 \Rightarrow g_f^0 = 0. \quad (24)$$

Такое предположение существенно упрощает формулы (23), (13) и (16). Кроме того, в формулах (13) и (16) в оставшихся слагаемых некоторые члены можно вычислить в явном виде. Учитывая формулы (10) и (12), вычислим производную от функции Грина из формулы (13):

$$\frac{\partial G_\omega(a, \theta; r_0, \theta_0)}{\partial r} = \frac{\partial G_\omega(r, \theta; r_0, \theta_0)}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow a} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_m K_m(kr_0)}{2\pi a K_m(ka)} \cos[m(\theta - \theta_0)]. \quad (25)$$

Учитывая формулы (9), (11) и (19), вычислим интеграл по полубесконечному интервалу в (16):

$$\int_a^{\infty} G_m^\psi(r, r_0) \frac{\partial G_m^\omega(a, r)}{\partial \rho} r dr = \frac{\varepsilon}{\pi^2 a} \left[\left(\frac{a}{r_0} \right)^m - \frac{K_m(kr_0)}{K_m(ka)} \right], \quad m \geq 1,$$

$$\int_a^{\infty} G_0^\psi(r, r_0) \frac{\partial G_0^\omega(a, r)}{\partial \rho} r dr = \frac{\varepsilon}{4\pi^2 a} \left[1 - \frac{K_0(kr_0)}{K_0(ka)} \right]. \quad (26)$$

С учетом начального условия (24) и формул (22), (25) и (26) основная система интегральных уравнений (23), (13), (16) на первом шаге итерации по времени примет следующий вид:

$$\int_0^{2\pi} \left\{ \frac{\sqrt{\varepsilon}}{2\pi} \frac{K_1(ka)}{K_0(ka)} + \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{K_{m-1}(ka)}{K_m(ka)} \cos[m(\beta - \theta_0)] \right\} \omega_1(a, \beta) d\beta = v_0 \sin \theta_0, \quad (27)$$

$$\omega_1(r_0, \theta_0) = \int_0^{2\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_m}{2\pi a} \frac{K_m(kr_0)}{K_m(ka)} \cos[m(\theta - \theta_0)] \omega_1(r, \theta) a d\theta, \quad (28)$$

$$\psi_1(r_0, \theta_0) = -\frac{\varepsilon}{2\pi} \left[1 - \frac{K_0(kr_0)}{K_0(ka)} \right] \int_0^{2\pi} \omega_1(a, \beta) d\beta - \frac{\varepsilon}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\left(\frac{a}{r_0} \right)^m - \frac{K_m(kr_0)}{K_m(ka)} \right] \int_0^{2\pi} \omega_1(a, \beta) \cos[m(\beta - \theta_0)] d\beta. \quad (29)$$

На первом шаге итерации по времени задачу можно решить аналитически. Решение уравнения (27) будем искать в виде $\omega_1(a, \beta) = A(a) \sin \beta$. При подстановке решения данного вида в соответствующую формулу в силу ортогональности тригонометрических функций интегрирование по β будет отлично от нуля только при $m = 1$:

$$\int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\pi} \frac{K_0(ka)}{K_1(ka)} \cos(\beta - \theta_0) A(a) \sin \beta d\beta = v_0 \sin \theta_0 \Rightarrow A(a) = kv_0 \frac{K_1(ka)}{K_0(ka)}.$$

Таким образом, решение на границе для функции завихренности примет вид

$$\omega_1(a, \beta) = kv_0 \frac{K_1(ka)}{K_0(ka)} \sin \beta. \quad (30)$$

Подставим полученное решение (30) для функции завихренности $\omega_1(a, \beta)$ на границе в формулы (28) и (29), откуда получим выражения для функций тока и завихренности во всей области потока:

$$\omega_1(r_0, \theta_0) = kv_0 \frac{K_1(kr_0)}{K_0(ka)} \sin \theta_0, \quad (31)$$

$$\psi_1(r_0, \theta_0) = -\frac{\sqrt{\varepsilon} v_0}{K_0(ka)} \left[\frac{a}{r_0} K_1(ka) - K_1(kr_0) \right] \sin \theta_0. \quad (32)$$

На рис. 2 представлены результаты тестового модельного расчета со следующими значениями основных параметров: $a=1$; $\nu_0=1$; $\tau=0,1$; $\nu=1$; $\varepsilon=\nu\tau=0,1$; $k=\sqrt{1/\varepsilon}\approx 3,1623$; $ka=3,1623$.

Значения функции завихренности и функции тока представлены в относительных безразмерных единицах, т.е. отнесены к наибольшему полученному значению во всем пространстве расчета соответственно. На рис. 2а представлена зависимость функции завихренности на границе круга, которая соответствует графику функции $y = \sin(x)$. По мере удаления от границы круга ($\tilde{r} = r - a$) величина максимума функции завихренности (рассчитанная как максимум по углу) уменьшается (см. рис. 2б) на расстоянии, равном одному радиусу, в 35 раз. Зависимость функции тока от угла при фиксированном значении r соответствует графику функции $y = -\sin(x)$ (см. рис. 2в). Значения функции тока на границе круга равны нулю, это легко видно из формулы (29) или (32) при $r_0 = a$. По мере удаления от границы максимальное значение функции тока сначала увеличивается и достигает наибольшего значения при некотором значении r , которое зависит от параметров задачи, а затем плавно уменьшается (см. рис. 2г).

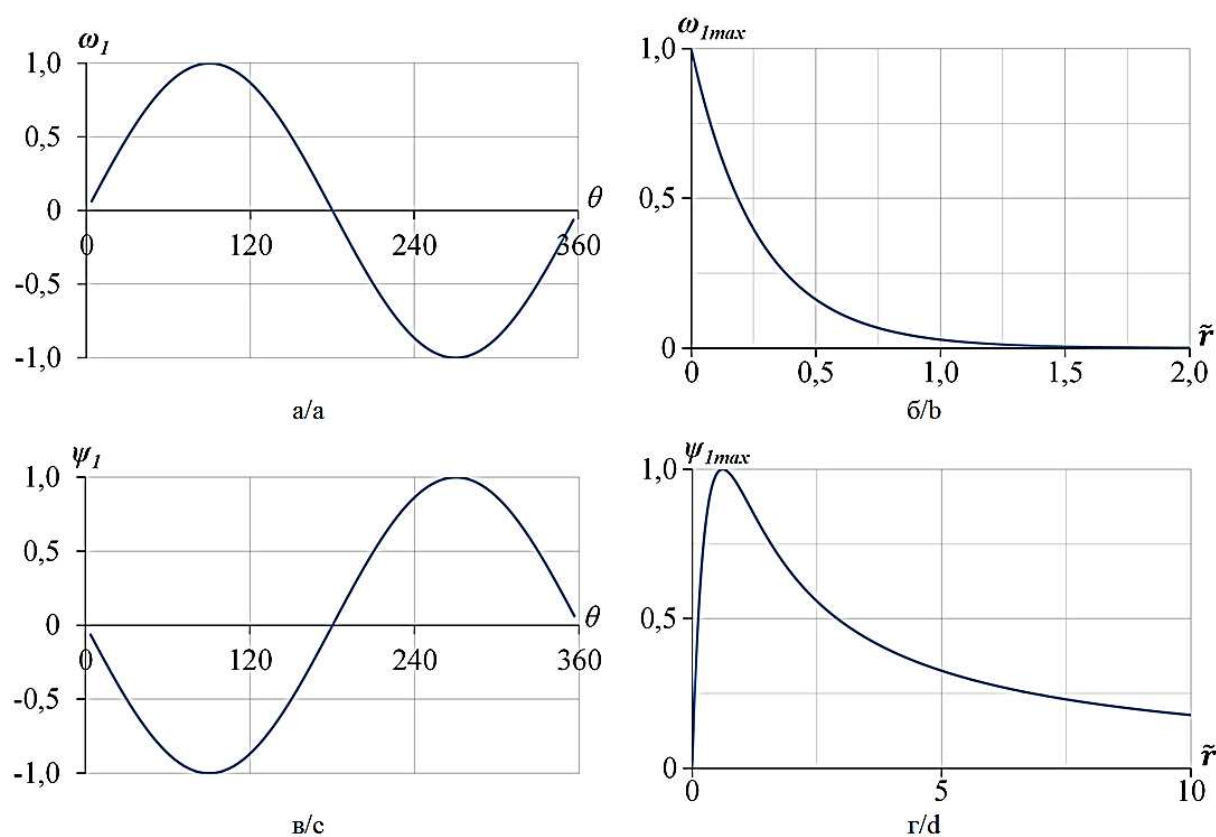


Рис. 2. Аналитическое решение для функций возмущенного течения на первой итерации: а – зависимость функции $\omega(a,\beta)$ на границе круга ($r = a$) от угла; б – изменение максимума ω_{\max} внутри жидкости;

в – зависимость ψ от угла на расстоянии $\tilde{r} = r - a$ от границы круга, где ψ_{\max} достигает наибольшего значения; г – изменение ψ_{\max} внутри жидкости / Fig. 2. Analytical solution for the perturbed stream function on the first iteration: a - function $\omega(a,\beta)$ on the boundary ($r = a$) versus polar angle; b - variation of maximum ω_{\max} in the fluid; c - function ψ versus polar angle, at the distance $\tilde{r} = r - a$ from the boundary of the circle, where ψ_{\max} attains its maximum value; d - variation of ψ_{\max} inside the fluid

Зарождение вихреобразования на границе кругового цилиндра

Предполагается, что разработанный итерационный алгоритм сходится при достаточно малом временном шаге τ . Исследуем, как от выбора временного шага меняется картина решения на первой итерации (рис. 3).

Анализ рис. 3 и формулы (31) показывает, что чем меньше выбранный шаг по времени, тем выше наибольшее значение ω_{1max} , которое достигается на границе цилиндра, но при этом уменьшается область локализации с нетривиальными значениями завихренности. Если $\tau \rightarrow 0$, то наибольшее значение функции ω_{1max} стремится к бесконечности, а ширина области локализации вихреобразования становится бесконечно малой. Таким образом, вихреобразование как бы прилеплено к границе цилиндра.

Описанная картина позволяет говорить о зарождении на первой итерации двух «обобщенных» вихрей. Это хорошо видно на рис. 4, где представлены изолинии функции тока на первом шаге итерации в зависимости от величины этого шага. Возникают два «обобщенных» вихря: один – над, а другой – под цилиндром, с противоположными направлениями вращения.

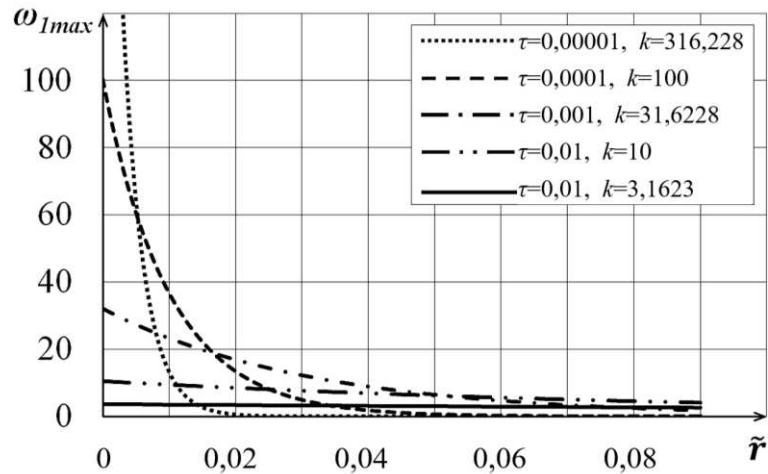


Рис. 3. Изменение максимальных значений возмущенной функции завихренности по мере удаления от границы цилиндра ($\tilde{r} = r - a$) для различных значений шага по времени / Fig. 3. Variation of maximum values of the perturbed vortex function with moving away from the boundary of the cylinder ($\tilde{r} = r - a$) for various time steps

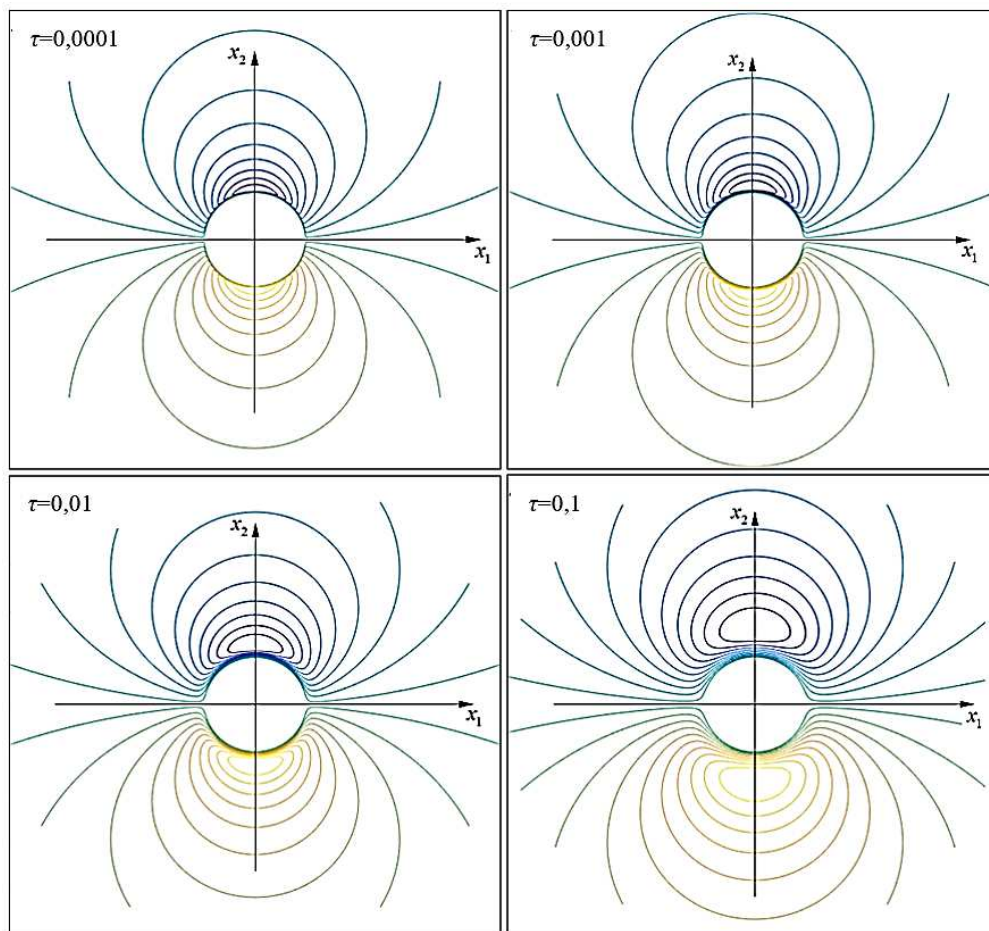


Рис. 4. Картина изолиний функции тока возмущенного течения для различных значений шага по времени / Fig. 4. Isolines for stream function of the perturbed flow for various values of time step

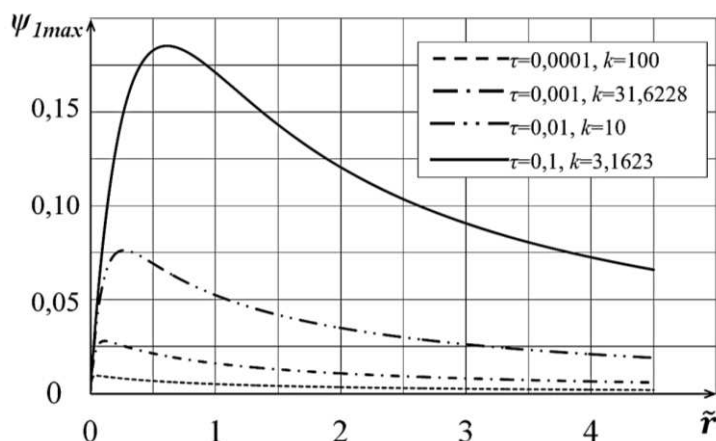


Рис. 5. Изменение максимальных значений возмущенной функции тока по мере удаления от границы цилиндра ($\tilde{r} = r - a$) для различных значений шага по времени / Fig. 5. Variation of maximum value of the perturbed stream function with moving away from the boundary of the cylinder ($\tilde{r} = r - a$) for various time steps

При малом шаге τ ядро «обобщенного» вихря прилипает к границе цилиндра, но по мере увеличения шага вихрь отлипает от границы и движется внутрь потока. Центр ядра данного вихря совпадает с положением максимума графика изменения функции $\psi_{1\max}$, что можно наблюдать на рис. 5. Чем больше шаг по времени, тем дальше от границы и тем выше этот максимум.

Анализ картины решения задачи на первой итерации по времени в зависимости от величины временного шага τ можно рассматривать как эволюцию вихря от его зарождения на границе обтекаемого тела до отрыва с поверхности цилиндра и движения внутрь потока.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе представлен итерационный по времени метод решения задачи обтекания цилиндра потоком вязкой жидкости, реализованный на основе метода ГИУ со специальными функциями Грина для уравнений Гельмгольца и Пуассона в потоке вне цилиндра, удовлетворяющими однородному краевому условию Дирихле на границе обтекаемого тела.

2. Из предположения о начальном невозбужденном потоке (во всей области потока $\omega_0 = 0$) получено аналитическое решение задачи на первом шаге итерации, которое описывает возбужденный поток. Зависимость функции завихренности возмущенного потока от радиального угла при фиксированном r представляет собой синусоиду, амплитуда которой максимальна на границе тела и монотонно уменьшается по мере удаления от границы.

3. Анализ полученного решения на первом шаге итерации в зависимости от величины временного шага τ позволяет сделать вывод о зарождении вихреобразования. При $\tau \rightarrow 0$ на этапе зарождения вихрь представляет собой структуру, локализованную вблизи границы. По мере увеличения шага формируются два «обобщенных» вихря – над и под цилиндром с противоположным направлением вращения. Отрываясь от поверхности, вихрь как бы растекается по пространству потока. Центр такого вихря совпадает с максимальным значением возмущенной функции тока в пространстве.

Список источников

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. 4-е изд. М.: Наука, 1973. 848 с.
2. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. 2-е изд. М.: МЦНМО, 2000. 402 с.
3. Доронин Ю.П. Физика океана: учеб. пособие. СПб.: РГГМУ, 2000. 340 с.
4. Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В., Шанталинский К.М., Важнова Н.А. Теория общей циркуляции атмосферы: учеб. пособие. Казань: Казанский ун-т, 2013. 224 с.
5. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 183 с.
6. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. Механика сплошных сред: лекции. М.: Изд-во физ. факультета МГУ, 1998. 92 с.
7. Decher R. The Vortex and the Jet. Singapore: Springer, 2022. 175 p.
8. Мушин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А. Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
9. Божков В.М., Васильев Л.Е., Жигулев С.В. Особенности поперечного обтекания кругового цилиндра // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1980. № 2. С. 154–157.

10. Головкин В.А., Калявкин В.М., Колков В.Г. Оптическая визуализация обтекания кругового цилиндра на режимах разгона и торможения потока // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1981. № 2. С. 136–142.
11. Unal U.O., Atlar M. An experimental investigation into the effect of vortex generators on the near-wake flow of a circular cylinder // *Experiments in Fluids*. 2010. Vol. 48, № 6. P. 1059–1079.
12. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method*. Vol. 3: Fluid Dynamics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 347 p.
13. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*. Heidelberg: Springer International, 2019. 816 p.
14. DESider - A European Effort on Hybrid RANS-LES Modelling. Ed. by W. Haase, M. Braza, A. Revell. Heidelberg: Springer, 2009.
15. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.
16. Мазо А.Б. Вычислительная гидродинамика. Ч. 1: Мат. модели, сетки и сеточные схемы: учеб. пособие. Казань: Казанский ун-т, 2018. 165 с.
17. Охотников Д.И. Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода на сетках с локальным сгущением // Учен. зап. Казанского ун-та. Физ.-мат. науки. 2017. Т. 159, № 2. С. 216–230.
18. Мажукин В.И., Самарский А.А., Капельянос О., Шапранов А.В. Метод динамической адаптации для нестационарных задач с большими градиентами // Мат. моделирование. 1993. Т. 5, № 4. С. 32–56.
19. Годунов С.К., Прокопов Г.П. Об использовании подвижных сеток в газодинамических расчетах // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1972. Т. 12, № 2. С. 429–440.
20. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987. 525 с.
21. Dargush G.F., Banerjee P.K. A time-dependent incompressible viscous BEM for moderate Reynolds numbers // *Int. J. Numer. Meth. Enging*. 1991. Vol. 31. P. 1627–1648.
22. Aydin M., Fenner R.T. Boundary element analysis of driven cavity flow for low and moderate Reynolds numbers // *Int. J. Numer. Meth. Fluids*. 2000. Vol. 37. P. 45–64.
23. Grigoriev M.M., Dargush A.V. A poly-region boundary element method for incompressible viscous fluid flows // *Int. J. Numer. Meth. Enging*. 1999. Vol. 46. P. 1127–1158.
24. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
25. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1, 2. М.: Мир, 1991.
26. Cottet G.-H., Koumoutsakos P.D. *Vortex Methods: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 328 p.
27. Колтон Д., Кресс Р. Методы интегральных уравнений в теории рассеяния. М.: Мир, 1987. 312 с.
28. Duffy D.G. *Green's Functions with Applications*. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall, 2001. 404 p.
29. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды: специальные функции. М.: Наука, 1983. 751 с.

References

1. Loitsyansky L.G. *Mechanics of liquid and gas*. 4th ed. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 848 p. (In Russ.).
2. Shmidt V.V. *Introduction to physics of superconductors*. 2nd ed. Moscow: Moscow Center for Continuing Mathematical Education Press; 2000. 402 p. (In Russ.).
3. Doronin Yu.P. *Physics of ocean*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University Press; 2000. 340 p. (In Russ.).
4. Perevedentsev Yu.P., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Shantalinsky K.M., Vazhnova N.A. *Theory of general circulation of atmosphere*. Kazan: Kazan University Press; 2013. 224 p. (In Russ.).
5. Merkulov A.P. *Vortex effect and its applications in engineering*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1969. 183 p. (In Russ.).
6. Aleshkevich V.A., Dedenko L.G., Karavaev V.A. *Mechanics of continua*. Moscow: Physical Faculty of Moscow State University Press; 1998. 92 p. (In Russ.).
7. Decher R. *The Vortex and the Jet*. Singapore: Springer Publ.; 2022. 175 p.
8. Munin A.G., Kuznetsov V.M., Leontiev E.A. *Aerodynamic sources of noise*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1981. 248 p. (In Russ.).
9. Bozhkov V.M., Vasil'ev L.E., Zhigulev S.V. Transverse subsonic flow past a cylinder. *Fluid Dynamics*. 1980;15:303-306.
10. Golovkin V.A., Kalyavkin V.M., Kolkov V.G. Optical visualization of accelerated and decelerated flow over a circular cylinder. *Fluid Dynamics*. 1981;16:266-271.
11. Unal U.O., Atlar M. An experimental investigation into the effect of vortex generators on the near-wake flow of a circular cylinder. *Experiments in Fluids*. 2010;48(6):1059-1079.

12. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method. Vol. 3: Fluid Dynamics*. Oxford: Butterworth-Heinemann Publ.; 2000. 347 p.
13. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*. Heidelberg: Springer International Publ.; 2019. 816 p.
14. Haase W., Braza M., Revell A., eds. *DESider - A European Effort on Hybrid RANS-LES Modelling*. Heidelberg: Springer Publ.; 2009.
15. Belov I.A., Isaev S.A. *Modeling of turbulent flows*. St. Petersburg: Baltic State Technical University Press; 2001. 108 p. (In Russ.).
16. Mazo A.B. *Computational hydrodynamics. Part 1: Mathematical models, grids and mesh schemes*. Kazan: Kazan University Press; 2018. 165 p. (In Russ.).
17. Okhotnikov D.I. Direct numerical modeling of the laminar-turbulent transition on meshes with local densening. *Uchen. zap. Kazanskogo un-ta. Fiz.-mat. Nauki = Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series*. 2017;159(2):216-230. (In Russ.).
18. Mazhukin V.I., Samarsky A.A., Kasteliano O., Shapranov A.V. Method of dynamic adaptation for transient problems with large gradients. *Mat. modelirovanie = Mathematical Modelling*. 1993;5(4):32-56. (In Russ.).
19. Godunov S.K., Prokopov G.P. The use of moving meshes in gas-dynamical computations. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1972;12(2):182-195.
20. Brebbia K., Telles J., Vroubel L. *Methods of boundary elements*. Moscow: Mir Publ.; 1987. 525 p. (In Russ.).
21. Dargush G.F., Banerjee P.K. A time-dependent incompressible viscous BEM for moderate Reynolds numbers. *Int. J. Numer. Meth. Enging*. 1991;31:1627-1648.
22. Aydin M., Fenner R.T. Boundary element analysis of driven cavity flow for low and moderate Reynolds numbers. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*. 2000;37:45-64.
23. Grigoriev M.M., Dargush A.V. A poly-region boundary element method for incompressible viscous fluid flows. *Int. J. Numer. Meth. Enging*. 1999;46:1127-1158.
24. Roach P. *Computational fluid dynamics*. Moscow: Mir Publ.; 1980. 616 p. (In Russ.).
25. Fletcher K. *Computational methods in fluid dynamics*. Vol. 1, 2. Moscow: Mir Publ.; 1991. (In Russ.).
26. Cottet G.-H., Koumoutsakos P.D. *Vortex Methods: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press; 2000. 328 p.
27. Colton D., Kress R. *Methods of integral equations in scattering theory*. Moscow: Mir Publ.; 1987. 312 p. (In Russ.).
28. Duffy D.G. *Green's Functions with Applications*. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall / CRC Publ.; 2001. 404 p.
29. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Integrals and series: Special functions*. Moscow: Nauka Publ.; 1983. 751 p. (In Russ.).

Информация об авторах

М.А. Сумбатян – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.
Р.М. Закарян – аспирант, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

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.
R.M. Zakaryan - Postgraduate Student, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 28.07.2023; одобрена после рецензирования 12.08.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 28.07.2023; approved after reviewing 12.08.2023; accepted for publication 30.10.2023.

Научная статья

УДК 536.246

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-55-60

ВЫСОТА МИКРО- И НАНОКАПЛИ В МОДЕЛИ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ТОЛЩИНУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КАПЛИ

Михаил Евгеньевич Щербаков^{1✉}, Евгений Николаевич Калайдин²

^{1,2} Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

¹latiner@mail.ru✉

²kalaidin@econ.kubsu.ru

Аннотация. Рассматривается висящая капля фиксированного объема, обладающая осевой симметрией. Образующая линия поверхности капли зависит от натурального параметра. Применяется модель Б.В. Дерягина, учитывающая межфазный переход от жидкости к газу. Используется функционал полной энергии, учитывающий расклинивающую энергию поверхностного слоя – составляющую второго порядка малости в разложении потенциальной энергии капли по обезразмеренной ширине потенциальной ямы. Найдено уравнение зависимости высоты капли от радиуса пятна прилипания. Определено значение множителя Лагранжа, при котором среди висящих капель с фиксированным объемом, фиксированной площадью прилипания к горизонтальной поверхности и углом смачивания, определяемым формулой Юнга, найдется равновесная капля. Проведено сравнение с другими моделями, определяющими связь высоты капли, радиуса пятна прилипания капли и угла смачивания.

Ключевые слова: функционал полной энергии капли, расклинивающая энергия, модель Дерягина, функционал Уиллмора, условие равновесия капли, угол смачивания капли, нанокapля, ранжирование полной энергии капли, поверхность Гиббса, высота нанокapли

Для цитирования: Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н. Высота микро- и нанокapли в модели, учитывающей толщину поверхностного слоя капли // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 55–60.

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

Original article

THE HEIGHT OF THE MICRO AND NANO DROPLETS IN THE MODEL TAKING INTO ACCOUNT THE THICKNESS OF THE SURFACE LAYER OF THE DROPLET

Mikhail E. Shcherbakov^{1✉}, Evgeny N. Kalaydin²

^{1,2} Kuban State University, Krasnodar, Russia

¹latiner@mail.ru✉

²kalaidin@econ.kubsu.ru

Abstract. A hanging drop of a fixed volume with axial symmetry is considered. The forming line of drop surface depends on a natural parameter. The B.V. Deryagin's model is used taking into account the interphase transition from liquid to gas. The total energy functional is used which takes into account the wedging energy of the surface layer component of the second order of smallness in the decomposition of the potential energy of the drop over the dimensionless width of the potential well. It is found the equation of the dependence of the drop height on the radius of the sticking spot. The value of the Lagrange multiplier is determined, at which an equilibrium drop is found among hanging drops of a fixed volume, a fixed area of adhesion to a horizontal surface and the wetting angle determined by Young's formula. A comparison with other models determining the relationship between the height of the drop, the radius of the spot of adhesion of the drop and the wetting angle is carried out.

© Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н., 2023

Keywords: drop total energy functional, wedging energy, Deryagin model, Willmore functional, drop equilibrium condition, drop wetting angle, nano droplet, drop total energy ranking, Gibbs surface, nano droplet height

For citation: Shcherbakov M.E., Kalaydin E.N. The Height of the Micro and Nano Droplets in the Model Taking into Account the Thickness of the Surface Layer of the Droplet. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):55-60. (In Russ.).

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

Введение

Закон капиллярного давления Лапласа [1, 2] для каплей, обладающих осевой симметрией относительно вертикальной оси OX (рисунок), можно записать в виде $2H = 2b + cx$, где функция $x = x(y)$ связывает горизонтальные и вертикальные координаты точки на образующей линии поверхности капли; $c = \sigma_{LG}/g\rho$ – капиллярная постоянная; b – кривизна поверхности в вершине; H – средняя кривизна поверхности капли.

Этот закон, используя выражение для $2H$, можно переписать в виде [3] $\frac{x''}{(1+(x')^2)^{3/2}} + \frac{x'}{y(1+(x')^2)^{1/2}} = 2b + cx$, где $x' = \frac{dx}{dy}$, $x'' = \frac{dx'}{dy}$.

Численное решение этого уравнения для сидячей капли было найдено и табулировано [4, 5] для различных чисел Бонда $\beta = cR_0^2$, которые определяют степень отклонения поверхности, обладающей осевой симметрией, от сферы. R_0 – радиус кривизны в вершине поверхности.

В работе [6] для определения равновесной формы поверхности капли в модели, где переход от газообразной фазы к жидкой происходит скачком, используется решение вариационной задачи о минимуме функционала E полной энергии капли

$$y(x) = \int_0^x \frac{f(t)dt}{\sqrt{1+f^2(t)}}, \quad f(t) = \frac{-ct^2}{2} + \left(\frac{cX_A}{2} + \frac{1-\cos\theta_0}{X_A}\right)t + \cos\theta_0,$$

где θ_0 – угол смачивания, определяемый формулой Юнга $\cos\theta_0 = \frac{\sigma_{LS}-\sigma_{GS}}{\sigma_{LG}}$; σ_{LS} , σ_{LG} , σ_{GS} – коэффициенты поверхностного натяжения между жидкостью и твердым телом, жидкостью и газом, газом и твердым телом.

В [3] получено равенство, связывающее высоту капли X_A и радиус пятна Y_A прилипания: $Y_A = \int_0^{X_A} \frac{f(t)dt}{\sqrt{1+f^2(t)}}$.

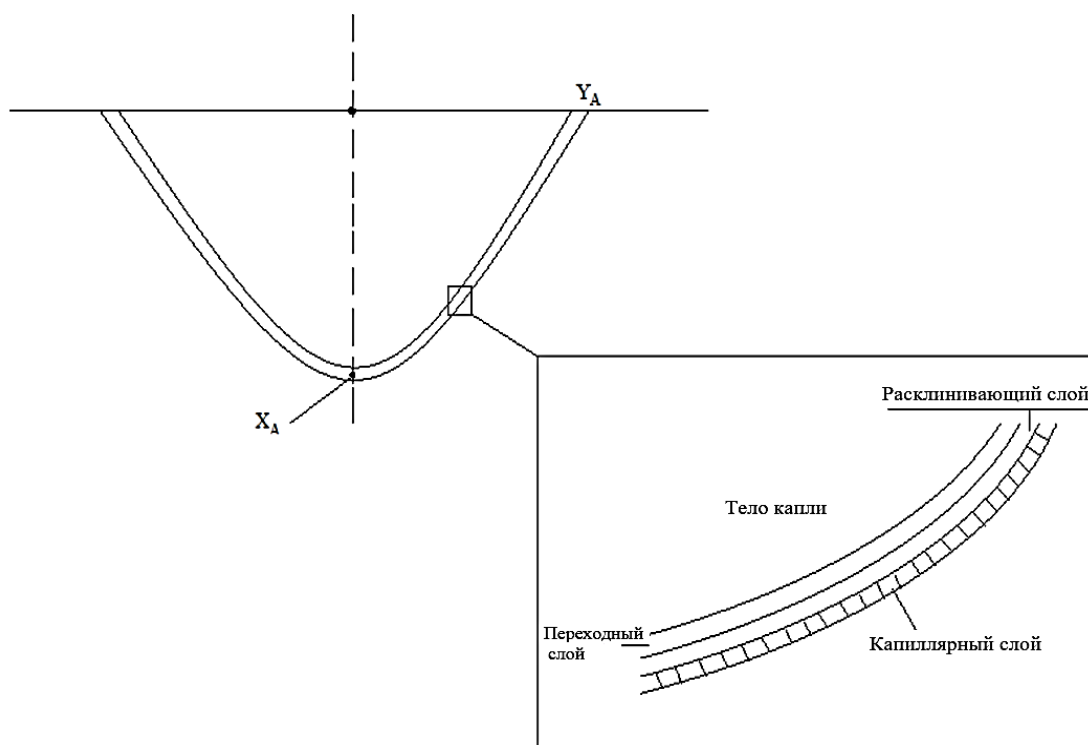
Связь между высотой капли и радиусом пятна прилипания представлена в интегральном виде, в силу чего на практике используются приближенные методы описания поверхности каплей.

$$\text{Значение } Y_A \text{ в работах [3, 6] было представлено в виде } X_A = \frac{1}{A_0} \frac{\sin\theta_0}{(1+\cos^2\theta_0)} Y_A.$$

Чтобы переход от фазы жидкого состояния к газообразному был непрерывным, необходимо учесть влияние расклинивающего слоя ненулевой толщины между двумя разными фазами [7–9].

Предполагается, что в поверхностном слое происходит перемешивание молекул различных субстанций. Для установления степени влияния поверхностного слоя изучались свойства капли в условиях невесомости [10, 11]. Чтобы учесть влияние поверхностного слоя, был разработан RSM-метод [12–15], дополняющий функционал полной энергии капли функционалом расклинивающей энергии, формирующей поверхностный слой капли $E_{\text{раскл}}(S) = -\pi h_m \sigma_{LG} \int_0^L \dot{y} \arcsin \dot{x} ds$, где S – поверхность вращения, определяемая образующей линией $(x(s), y(s))$; $s \in [0, L]$ – натуральный параметр; $x(s) = x(y(s))$; $x(0) = 0$; $y(0) = Y_A$; $x(L) = X_A$; $y(L) = 0$.

С учетом влияния поверхностного слоя в работах [12–16] было представлено условие равновесия жидкой висящей капли $2H + h_m K = \frac{1}{\sigma_{LG}} (g\rho x + \lambda)$, на основании которого в этой работе будет выведена связь между высотой капли, радиусом пятна прилипания капли и углом смачивания, исходя из краевых условий. В уравнении K – гауссова кривизна; λ – множитель Лагранжа; h_m – толщина расклинивающего слоя.



Структура поверхностного слоя капли, предложенная Б.В. Дерягиным
 / The structure of the surface layer proposed by B.V. Deryagin

Постановка задачи и её решение

Для равновесной капли, лежащей на твердой поверхности, в модели, учитывающей влияние толщины поверхностного слоя, необходимо найти зависимость между высотой капли X_A , радиусом пятна прилипания капли Y_A и углом смачивания θ_0 , а также получить множитель Лагранжа, при котором существует решение вариационной задачи поиска экстремальной поверхности.

Для висящей капли с фиксированным объемом V , поверхность вращения S которой в окрестности точки $(0, Y_A)$ задается гладкой образующей линией $(x(s), y(s))$, условие равновесия имеет вид [12–16]

$$2H + h_m K = \frac{1}{\sigma_{LG}} (g\rho x + \lambda), \quad (1)$$

где

$$\lambda = \frac{\sigma_{LG}}{Y_A^2} \left[2 \sin \theta_0 Y_A + h_m \cos^2 \theta_0 - \frac{1}{c\pi} V \right]. \quad (2)$$

После перехода к натуральному параметру s условие равновесия капли принимает вид

$$\left(\frac{\dot{x}}{y} + \frac{\ddot{x}}{\dot{y}} \right) + h_m \left(\frac{-\dot{y}}{y} \right) = \frac{1}{c} x(s) + \frac{\lambda}{\sigma_{LG}}, \quad (3)$$

где $\dot{x} = \frac{dx}{ds}$, $\dot{y} = \frac{dy}{ds}$.

Учитывая, что $\dot{x}(s) = \sin \varphi(s)$, где $\varphi(s(y))$ – угол между касательной образующей линии поверхности капли и осью OY , зависящий от переменной y , условие равновесия (3) можно записать в виде уравнения $\frac{d}{dy} (y \sin \varphi(y) - \frac{h_m}{2} (\sin \varphi(y))^2) = \left(\frac{1}{c} x(y) + \frac{\lambda}{\sigma_{LG}} \right) y$, интегрируя которое получим $\int_0^y d \left(\tau \sin \varphi(\tau) - \frac{h_m}{2} (\sin \varphi(\tau))^2 \right) = \int_0^y \left(\frac{1}{c} x(\tau) + \frac{\lambda}{\sigma_{LG}} \right) \tau d\tau$.

Разделив на y^2 решение последнего равенства и перейдя к пределу при $y \rightarrow 0$, в силу того, что $\sin \varphi(0) = 0$, $x(0) = X_A$, приходим к соотношению

$$(\sin' \varphi(0))^2 - \frac{2}{h_m} \sin' \varphi(0) + \frac{1}{h_m} \left(\frac{1}{c} X_A + \frac{\lambda}{\sigma_{LG}} \right) = 0.$$

Используя вид коэффициента Лагранжа (2), запишем корни этого уравнения в виде

$$\sin' \varphi(0) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c} X_A + \frac{1}{Y_A^2} \left[2 \sin \theta_0 Y_A + h_m \cos^2 \theta_0 - \frac{1}{\pi c} V \right] \right). \quad (4)$$

Заметив, что $\frac{d}{dy} \left(\frac{1}{c} x(y) + \frac{\lambda}{\sigma_{LG}} \right) = \frac{\sin \varphi(y)}{c \sqrt{1 - (\sin \varphi(y))^2}}$, получим

$$\frac{1}{c} (x(y) - x(0)) = \int_0^y \frac{\sin \varphi(\tau)}{c} \left(1 + \frac{1}{2} (\sin \varphi(\tau))^2 + \bar{o}((\sin \varphi(\tau))^2) \right) d\tau, \quad \text{откуда следует, что}$$

$$x(y) - X_A \approx \sin' \varphi(0) \frac{y^2}{2}.$$

В силу (4) $x(y) - X_A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c} X_A + \frac{1}{Y_A^2} \left[2 \sin \theta_0 Y_A + h_m \cos^2 \theta_0 - \frac{1}{\pi c} V \right] \right) \frac{y^2}{2}$.

Перейдя к пределу при $y \rightarrow Y_A$ и учитывая, что $x(Y_A) = 0$, определим высоту капли

$$X_A = \frac{\left| 2 \sin \theta_0 Y_A + h_m \cos^2 \theta_0 - \frac{1}{\pi c} V \right|}{4 \left| \frac{Y_A^2}{2c} + 1 \right|}.$$

Высота макрокапли определяется из формулы $X_A \approx \frac{V}{2\pi Y_A^2}$.

Для микрокапель высота капли пропорциональна радиусу пятна прилипания $X_A \approx \frac{\sin \theta_0 Y_A}{2}$, что соответствует результату, полученному в работе [6], и опытам [17, 18] для капель на гидрофильной поверхности.

Для капли наноразмера получили формулу, в которой высота зависит как от радиуса пятна прилипания, так и от толщины промежуточного слоя

$$X_A \approx \frac{1}{2} \sin \theta_0 Y_A + h_m \frac{\cos^2 \theta_0}{4}. \quad (5)$$

Интегрируя левую и правую части уравнения (1), записанного с помощью натурального параметра s по пятну $[0, 2\pi] \times [0, L]$, получим $2\pi \int_0^L \sigma_{LG} [(2H + h_m K)] \dot{y}(s) ds = \pi \lambda Y_A^2 + g\rho V$.

Используя представление гауссовой и средней кривизны, с помощью натурального параметра $K(s) = -\frac{\dot{y}}{y} = \frac{\dot{x}\dot{x}}{y\dot{y}}$, $2H(s) = \frac{\dot{x}}{y} + \frac{\dot{y}}{\dot{y}}$, придем к соотношению

$$2\pi \sigma_{LG} \int_0^L d(\dot{x}y) - h_m \pi \sigma_{LG} \int_0^L d(\dot{y})^2 = \pi \lambda Y_A^2 + g\rho V.$$

В силу равенств $\dot{y}(0) = \cos \theta_0$, $\dot{x}(0) = -\sin \theta_0$, $y(0) = Y_A$, $y(L) = 0$, $\dot{y}(L) = 0$, $\dot{x}(L) = 1$, $\dot{x}^2 + \dot{y}^2 = 1$ получаем уравнение, из которого следует (2):

$$2\pi \sigma_{LG} \sin \theta_0 Y_A + \pi h_m \sigma_{LG} \cos^2 \theta_0 = \pi \lambda Y_A^2 + g\rho V.$$

Заключение

Для супергидрофильных поверхностей, где угол смачивания находится в промежутке $5 \div 10^\circ$, высота капель размером $10^{-8} \div 2 \times 10^{-9}$ м, вычисленная с помощью RSM-метода, отличается на $10 \div 20$ % от значений, вычисленных в предположении отсутствия поверхностного слоя [3, 18, 19].

Необходимо отметить, что для поверхностей с нулевым углом смачивания и супергидрофильных учет поверхностного слоя капли радиуса меньше 2×10^{-9} м приводит (5) к количественным результатам, требующим уточнения, так как высота капли становится меньше толщины поверхностного слоя. В этом случае для корректного определения высоты равновесной капли необходимо учесть упругую энергию промежуточного слоя [12, 20, 21], которая представляется членом третьего порядка малости в разложении [15] полной энергии капли по обезразмеренной ширине потенциальной ямы.

Список источников

1. Young T. Philosophical Transactions of the Royal Society. 1805. Vol. 95. 65 p.
2. Laplace P.S. Théorie de l'action capillaire. Supplément au dixième livre du traité de mécanique céleste. Paris: Courcier, 1806. 143 p.
3. Матюхин С.И., Фроленков К.Ю. Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15, № 3. С. 292–304.
4. Bashforth F., Adams J. C. An Attempt to Test the Theories of Capillary Action. Cambridge University Press, 1883. 144 p.
5. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 698 p.
6. Марков И. И., Батулин М. В., Иванов М. Н., Напольская Г.Ю. Определение оптимальных параметров капли вариационным методом // Вестн. Сев.-Кавк. гос. техн. ун-та. 2009. № 2 (19). С. 51.

7. Дерягин Б.Я., Обухов Е. В. Аномальные свойства тонких слоев жидкостей // Коллоид. журн. 1935. Т. 1, № 5. С. 385–398.
8. Дерягин Б.В. Свойства тонких жидких слоев и их роль в дисперсных системах. М.: ВСНТО, 1937. 22 с.
9. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 159 с.
10. Мышкис А.Д., Бабский В.Г., Копачевский Н.Д., Слобожанин Л.А., Тюпцов А.Д. Гидромеханика невесомости. М.: Наука, 1976. 504 с.
11. Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Копачевский Н.Д., Слобожанин Л.А., Тюпцов А.Д. Методы решения задач гидромеханики для условий невесомости. Киев: Наукова думка, 1992. 590 с.
12. Щербаков Е.А., Щербаков М.Е. О равновесии подвешенной капли с учетом изгибной жесткости промежуточного слоя // Докл. РАН. Физика, техн. науки. 2012. Т. 53, № 6. С. 243–244.
13. Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н. Энергия формирования промежуточного слоя. Ранжирование энергий капли // Осенние математические чтения в Адыгее : материалы IV Междунар. науч. конф. Майкоп, 2021. С. 299.
14. Щербаков М.Е. О союзном функционале гауссовой кривизны и равновесных формах жидких капель // Экол. вестн. науч. центров ЧЭС. 2019. № 1. С. 6–12.
15. Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н. Геометрические характеристики нанокapли. Ранжирование энергии капли // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 55–63.
16. Коровкин В.П., Секриеру Г.В., Сажин Ф.М. Анализ связи капиллярного и расклинивающего давления // Матем. исследования. Кишинев, 1989. Т. 108. С. 27–32.
17. Padday J. F. Corrected Methods for Surface Tension and Spreading Coefficients // Proc. of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1972. Vol. 330, № 1583. P. 561.
18. Марков И. И., Батулин М. В. Циклы природы и общества // Материалы V Междунар. конф. Ставрополь, 1997. Ч. 2. С. 94–97.
19. Diaz M.E., Fuentes J., Cerro R.L., Savage M.D. An analytical solution for a partially wetting puddle and the location of the static contact angle // J. of Colloid and Interface Science. 2010. Vol. 1, № 348 (1). P. 232–239.
20. Keller J.B., Merchant G.J. Flexural Rigidity of a Liquid Surface // J. of Statistical. 1991. Vol. 63, № 5/6. P. 1039–1051.
21. Финн Р. Равновесные капиллярные поверхности. Математическая теория. М.: Мир, 1989. 310 с.

References

1. Young T. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1805;95:65.
2. Laplace P.S. *Théorie de l'action capillaire. Supplément au dixième livre du traité de mécanique céleste*. Paris: Courcier, 1806. 143 p.
3. Matyukhin S. I., Frolenkov K. Yu. The shape of liquid droplets placed on a solid horizontal surface. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2013;15(3):292-304. (In Russ.).
4. Bashforth F., Adams J. K. *An attempt to test the theories of capillary action*. Cambridge: Cambridge University Press; 1883. 144 p.
5. Adamson A. *Physical chemistry of surfaces*. Moscow: Mir Publ.; 1979. 698 p. (In Russ.).
6. Markov I. I., Baturin M. V., Ivanov M. N., Napolskaya G. Yu. Determination of optimal drop parameters by variational method. *Vestn. Sev.-Kavk. gos. tekhn. un-ta = Bulletin of the North Caucasus State Technical University*. 2009;(2):51. (In Russ.).
7. Deryagin B. Ya., Obukhov E. V. Abnormal properties of thin layers of liquids. *Kolloid. zhurn. = Colloid Journal*. 1935;1(5):385-398. (In Russ.).
8. Deryagin B.V. *Properties of thin liquid layers and their role in dispersed systems*. Moscow: All-Union Council of Scientific Engineering Societies Press; 1937. 22 p. (In Russ.).
9. Deryagin B.V., Churaev N.V. *Wetting films*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 159 p. (In Russ.).
10. Myshkis A.D., Babsky V.G., Kopachevsky N.D., Slobozhanin L.A., Tyuptsov A.D. *Hydro mechanics of weightlessness*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 504 p. (In Russ.).
11. Babsky V.G., Zhukov M.Yu., Kopachevsky N.D., Slobozhanin L.A., Tyuptsov A.D. *Methods of solving problems of hydro mechanics for conditions of weightlessness*. Kyiv: Naukova dumka Publ.; 1992. 590 p. (In Russ.).
12. Shcherbakov E.A., Shcherbakov M.E. On the equilibrium of a suspended drop taking into account the bending stiffness of the intermediate layer. *Dokl. RAN. Fizika, tekhn. nauki = Doklady Physics*. 2012;53(6):243-244. (In Russ.).
13. Shcherbakov M.E., Kalaidin E.N. The energy of the formation of the intermediate layer. Ranking of drop energies. *Autumn mathematical readings in Adygea*. Materials of the Fourth International Scientific Conference. Maykop, 2021:299. (In Russ.).

14. Shcherbakov M.E. On the union functional of Gaussian curvature and equilibrium forms of liquid droplets. *Ekol. vestn. nauch. tsentrov ChES = Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Co-operation*. 2019;(1):6-12. (In Russ.).

15. Shcherbakov M.E., Kalaidin E.N. Geometric characteristics of nano droplets. Ranking of drop energy. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region*. 2023;(2):55-63. (In Russ.).

16. Korovkin V.P., Sekrieru G.V., Sazhin F.M. Analysis of the relationship between capillary and wedging pressure. *Matem. issledovaniya = Mathematical Research*. Chisinau, 1989;108:27-32. (In Russ.).

17. Padday J. F. Corrected Methods for Surface Tension and Spreading Coefficients. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1972;330(1583):561.

18. Markov I. I., Baturin M. V. Cycles of nature and society. *Materials of the V International Conference*. Stavropol, 1997;2:94-97. (In Russ.).

19. Diaz M.E., Fuentes J., Cerro R.L., Savage M.D. An analytical solution for a partially wetting puddle and the location of the static contact angle. *J. of Colloid and Interface Science*. 2010;1(348):232-239.

20. Keller J.B., Merchant G.J. Flexural Rigidity of a Liquid Surface. *J. of Statistical*. 1991;63(5/6):1039-1051.

21. Finn R. *Equilibrium capillary surfaces. Mathematical theory*. Moscow: Mir Publ.; 1989. 310 p. (In Russ.).

Информация об авторах

М.Е. Щербаков – преподаватель.

Е.Н. Калайдин – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра прикладной математики.

Information about the authors

M.E. Shcherbakov - Lecturer.

E.N. Kalaydin - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Applied Mathematics.

*Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 21.06.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 21.06.2023; accepted for publication 30.10.2023.*

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 551.554

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-61-69

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ СЕВЕРНАЯ ОСЕТИЯ – АЛАНИЯ

Аида Анатольевна Аджиева^{1✉}, *Геннадий Владимирович Куповых*²,
*Залина Музариевна Керефова*³

¹Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, Нальчик,
Кабардино-Балкарская Республика, Россия

²Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

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

¹aida-adzhieva@mail.ru[✉]

²kupovykh@sfedu.ru

³zknyaz-kbsu@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследования грозовой активности на территории Республики Северная Осетия – Алания, и в частности в районе всесезонного туристического комплекса «Мамисон». Выполнен анализ среднегодовых факторов грозовой и молниевой активности в период с 2012 по 2022 г. в теплый период времени (май – сентябрь) по данным грозопеленгационной системы LS8000. Сделана оценка соотношений количества молний облако – земля положительной и отрицательной полярности, исследовано влияние орографии местности на величину токов молний, определены территориальные особенности распределения токов молний облако – земля различной полярности. Полученное выражение линейного тренда для числа гроз показывает снижение грозовой активности за последние годы на исследуемой территории.

Ключевые слова: грозовая активность, грозопеленгация, молниевый разряд, атмосферное электричество, молниезащита

Для цитирования: Аджиева А.А., Куповых Г.В., Керефова З.М. Результаты анализа грозовой деятельности на территории Республики Северная Осетия – Алания // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 61–69.

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

RESULTS OF THE ANALYSIS OF THUNDERSTORM ACTIVITY ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF NORTH OSSETIA-ALANIA

Aida A. Adzhieva^{1✉}, Gennady V. Kupovykh², Zalina M. Kerefova³

¹Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

²Southern Federal University, Taganrog, Russia

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

¹aida-adzhieva@mail.ru✉

²kupovykh@srfedu.ru

³zknyaz-kbsu@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of thunderstorm activity study on the territory of the Republic of North Ossetia-Alania, and in particular, in the area of the all-season tourist complex “Mamison”. The analysis of the average annual factors of thunderstorm and lightning activity in the period from 2012 to 2022 in the warm period of time (May-September) according to the LS8000 thunderstorm direction finding system was performed. The estimation of the number of cloud-earth lightning ratios of positive and negative polarity is made, the influence of the orography of the terrain on the magnitude of lightning currents is investigated, the territorial features of the distribution of cloud-earth lightning currents of different polarity are determined. The resulting expression of the linear trend for the number of thunderstorms shows a decrease in thunderstorm activity in recent years in the study area.

Keywords: thunderstorm activity, lightning direction finding, lightning discharge, atmospheric electricity, lightning protection

For citation: Adzhieva A.A., Kupovykh G.V., Kerefova Z.M. Results of the Analysis of Thunderstorm Activity on the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):61-69. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was supported by 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

Грозы относятся к опасным метеорологическим явлениям. Они наносят значительный ущерб многим отраслям экономики, авиации, сельскому хозяйству, энергетике и т.д. Также грозы являются причиной 7–8 % всех весенне-летних пожаров. Поэтому важно знать характеристики грозоразрядной активности в зависимости от топографии местности и плотности их распределения.

В настоящее время в России имеет место интенсивное освоение высокогорных территорий под горнолыжные и туристические рекреационные комплексы. В частности, на Северном Кавказе создаются всепогодные туристические комплексы (ВТРК) «Эльбрус» в Кабардино-Балкарии, «Мамисон» в Северной Осетии – Алании (СОА), «Ведучи» в Чеченской Республике и др.

Создаваемые в высокогорных зонах Большого Кавказа рекреационные зоны включают такие объекты, как высоковольтные линии электропередачи, высотные мачты (опоры) канатных дорог, подвесные тросы канатных дорог, которые сильно подвержены воздействию молниевых разрядов и грозовым перенапряжениям. В этой связи для создаваемых ВТРК важно знать не только региональные характеристики гроз (число дней с грозой и продолжительность гроз в час в течение года), но и локальные характеристики грозовой активности, параметры разрядов молний.

В данной работе рассмотрено распределение гроз и параметров молнии по территории СОА, включая территорию создания ВТРК «Мамисон». Республика расположена на северном склоне Большого Кавказа. Высшая точка республики – гора Казбек 5033 м. В горной части республики, севернее Главного хребта, параллельно проходят четыре больших хребта: Боковой, Скалистый, Пастбищный и Лесистый.

Целью работы являлось определение среднестатистических значений токов молний облако – земля на территории СОА в теплый период времени (май – сентябрь).

Задачами исследований были:

- оценка соотношения количества молний облако – земля положительной и отрицательной полярности;
- выявление влияния орографии местности на величину токов молний облако – земля различной полярности;
- определение территориальных особенностей распределения токов молний облако – земля различной полярности.

Материалы и методы исследования

Для определения параметров наземных молний в данной работе использовалась грозопеленгационная сеть (ГПС) LS8000 фирмы Vaisala. Эта система была впервые в России развернута в 2008 г. на Северном Кавказе сотрудниками ФГБУ «ВГИ». Она состояла из четырех грозопеленгаторов и центрального пункта приема и обработки информации [1–3]. Грозопеленгаторы LS8000 расположены вблизи населенных пунктов: Кызбурун (КБР), Черкесск (КЧР), Ставрополь и Зеленокумск (Ставропольский край). С 2020 г. ГПС дополнена двумя грозопеленгаторами типа LS7002 той же фирмы, которые установлены вблизи населенных пунктов Туапсе и Кореновск. Такое расположение способствует более высокой эффективности работы системы с охватом всей территории Северного Кавказа и Черноморского побережья России.

Во время работы ГПС регистрирует такие параметры разряда, как дата и время, координаты, полярность, количество задействованных датчиков и др. [4, 5].

Для решения задач, поставленных в работе, были отобраны значения токов молний облако – земля за период наблюдения с 2012 по 2022 г. Всего за указанный период системой грозопеленгации по территории СОА зарегистрировано 103 818 молний указанного типа. Из них 8061 классифицирована как наземные молнии положительной полярности, а 95 757 – отрицательной полярности. Следовательно, соотношение количества наземных молний различной полярности составляет 1:12. Получены средние значения токов наземных молний: для положительной полярности – $I_{cp+}=31,89$ кА, для отрицательной полярности – $I_{cp-} = -16,54$ кА, а среднее значение тока по модулю составило $|I_{cp}| = 18,44$ кА, где I_{cp+} – среднее значение тока положительной полярности; I_{cp-} – среднее значение тока отрицательной полярности; $|I_{cp}|$ – среднее значение тока по модулю.

Орографию местности обычно относят к основным факторам, определяющим метеорологический режим в пограничном слое атмосферы. В некоторых работах [6, 7] была исследована зависимость числа и характеристик гроз от высоты местности над уровнем моря и отмечалось, что большие горные массивы оказывают существенное влияние, вызывая динамическую турбулентность и восходящие потоки по склону. В результате создаются импульсы мощных конвективных токов, способствующих усилению грозовых процессов. Таким образом, роль рельефа является одним из основных факторов формирования гроз.

Средняя высота над уровнем моря на территории СОА составляет 1145 м [8]. Комплекс ВТРК «Мамисон» располагается на высоте от 2080 до 3190 м над уровнем моря, где грозовая активность и параметры молний существенно отличаются от средних их значений на территории республики [9].

Результаты и их обсуждение

Исследование грозовой деятельности на территории СОА показало, что за последние 11 лет на рассматриваемой местности наблюдается снижение грозовой активности (числа гроз). Среднее количество дней с грозой в теплый период составляет 12–16 в месяц. Наибольшая продолжительность гроз наблюдается в летние месяцы. На рис. 1 приведено распределение гроз по годам на территории СОА в период с 2012 по 2022 г.

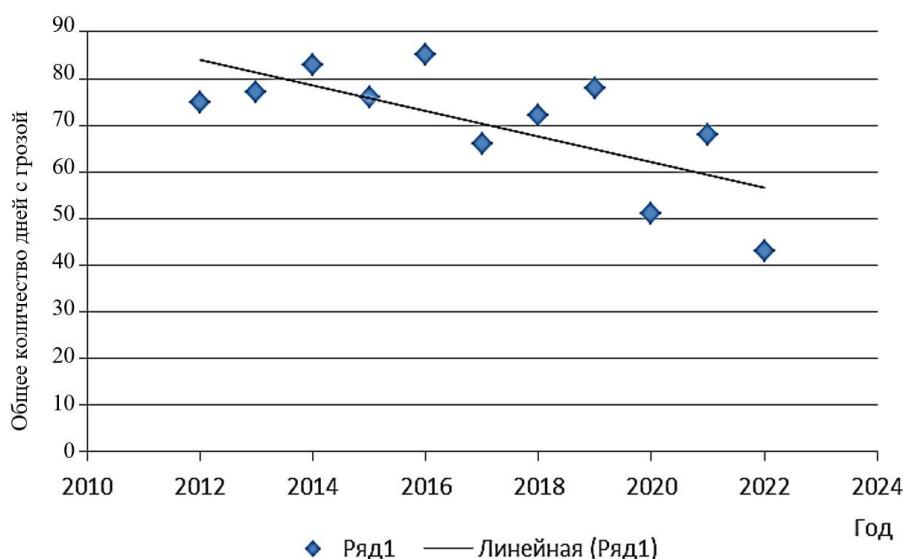


Рис. 1. Распределение числа гроз (по годам) / Fig. 1. Distribution of the number of thunderstorms by year

Исследована динамика грозовой активности по исследуемой территории, линейный тренд и уравнение тренда: $y=2,74x+5589,6$, где x – год (от 0 до 10); y – количество дней с грозой.

Наблюдается отрицательная корреляция ($k=-0,7$).

Полученное выражение линейного тренда для количества дней с грозой показывает снижение грозовой активности за последние три года на территории СОА.

В табл. 1 приведено среднегодовое число дней с грозой по месяцам за период с 2012 по 2022 г.

На рис. 2 представлена гистограмма распределения числа дней с грозой с 2012 по 2022 г. в теплый период на территории СОА. Как видно из рис. 2, наибольшее количество дней с грозой наблюдается в июне – до 24 грозовых дней в году (2019 г.) – и в августе – до 21 грозового дня (2014 г.).

В работе также рассчитывались токи наземных молний с учетом разделения на положительные и отрицательные разряды, а также построено их распределение по рассматриваемой территории.

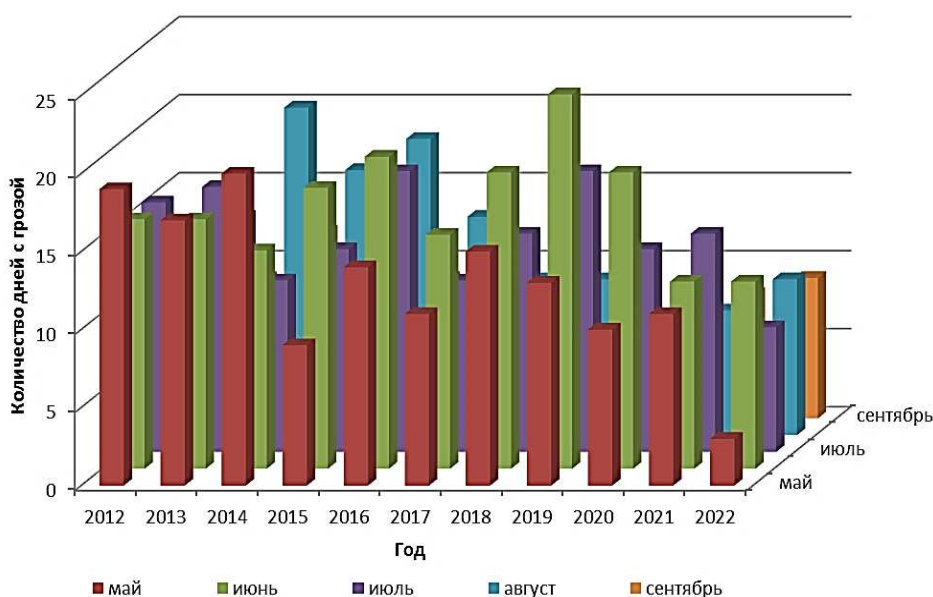


Рис. 2. Распределение количества дней с грозой в теплый период времени / Fig. 2. Distribution of the number of days with thunderstorms in the warm period

На рис. 3 показано распределение числа грозовых разрядов по территории СОА с мая по сентябрь с разделением на положительные и отрицательные разряды. Установлено, что за рассматриваемый период наблюдений наибольшее количество грозовых разрядов было зарегистрировано в июне.

Считается, что термодинамические характеристики атмосферы являются определяющими в формировании облако- и осадкообразования и, как следствие, грозовой активности [6]. Для определения зависимости количества гроз от среднегодовой температуры воздуха были рассмотрены средние значения температур в теплый период для пунктов наблюдений, находящихся на разных высотах над уровнем моря. Среднегодовые данные температуры рассчитаны для станций в г. Владикавказе, г. Моздоке и г. Алагире (табл. 2, рис. 4).

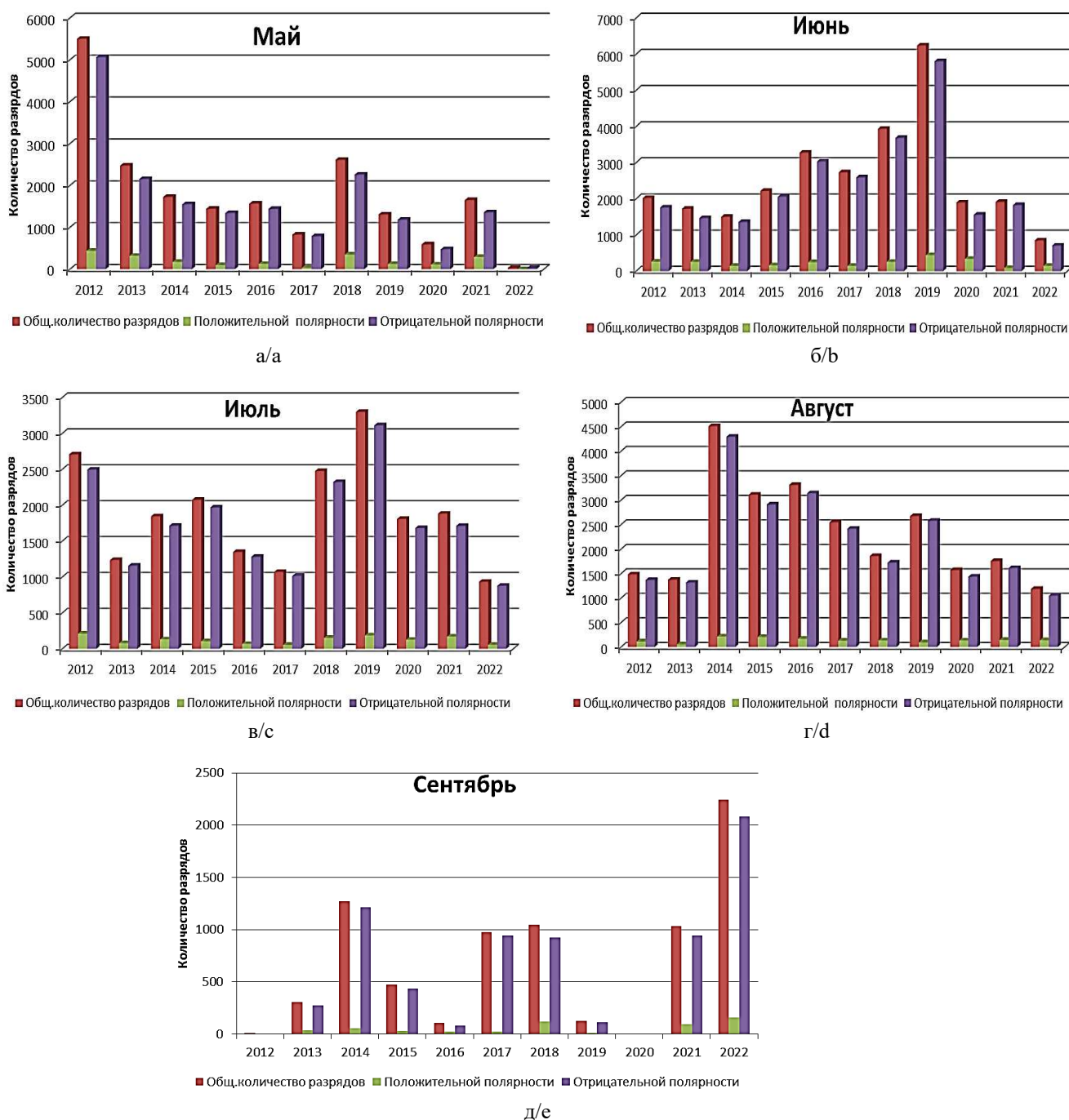


Рис. 3. Распределение числа разрядов с разделением на положительные и отрицательные в теплый период времени / Fig. 3. Distribution of the number of discharges divided into positive and negative in the warm period

Таблица 1 / Table 1

Число дней с грозой по месяцам / The number of days with a thunderstorms by month

Год	Месяц				
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2012	19	16	16	13	1
2013	17	16	17	14	9
2014	20	14	11	21	12
2015	9	18	13	17	9
2016	14	20	18	19	9
2017	11	15	11	14	10
2018	15	19	14	10	11
2019	13	24	18	10	6
2020	10	19	13	7	0
2021	11	12	14	8	8
2022	3	12	8	10	9

Таблица 2 / Table 2

Средняя температура в теплый период / Average temperature during the warm period

Год	Средняя температура с мая по сентябрь	Высота над уровнем моря, м		
		H _{min}	H _{max}	H _{ср}
Город Владикавказ				
2012	19,24	599	1221	734
2013	18,22			
2014	18,98			
2015	19,56			
2016	18,56			
2017	19,14			
2018	19,56			
2019	18,96			
2020	19,56			
2021	19,48			
2022	19,04			
Город Моздок				
2012	22,30	114	151	133
2013	21,38			
2014	22,56			
2015	22,68			
2016	21,48			
2017	22,16			
2018	22,6			
2019	22,28			
2020	22,74			
2021	22,72			
2022	22,52			
Город Алагир				
2012	19,74	545	869	614
2013	18,66			
2014	19,32			
2015	19,88			
2016	18,94			
2017	19,52			
2018	19,72			
2019	19,22			
2020	19,62			
2021	19,46			
2022	18,62			



Рис. 4. Распределение числа грозных разрядов и средней температуры воздуха в теплое время (по годам)
 / Fig. 4. Distribution of the number of lightning discharges and average air temperature in warm season (by year)

В рассматриваемый период (2012–2022 гг.) среднегодовое значение ударов молний в землю составило 9438. На рис. 4 приведены данные среднегодового числа грозных разрядов и средней температуры воздуха в теплое время на территории СОА. Наблюдается спад числа грозных разрядов за последние три года. Корреляционная связь между среднегодовыми значениями температуры и количеством разрядов не установлена (коэффициент корреляции менее 0,3).

Наземные молнии в большинстве случаев наблюдаются на высоте от 1 до 2 км [10]. Известно, что плотность поражения молниевыми разрядами на 1 км² возрастает с увеличением высоты до 2 км. На рис. 5 представлена плотность распределения разрядов по территории СОА.

В горной и предгорной частях плотность грозных разрядов варьирует от 4 до 8 разр/км², в то время как на равнине (г. Моздок) – от 0,5 до 1 разр/км². Таким образом, для проектирования молниезащитных мероприятий на территории ВТРК «Мамисон» рекомендуется учитывать удельное поражение земли молниями 8 разр/км² в год.

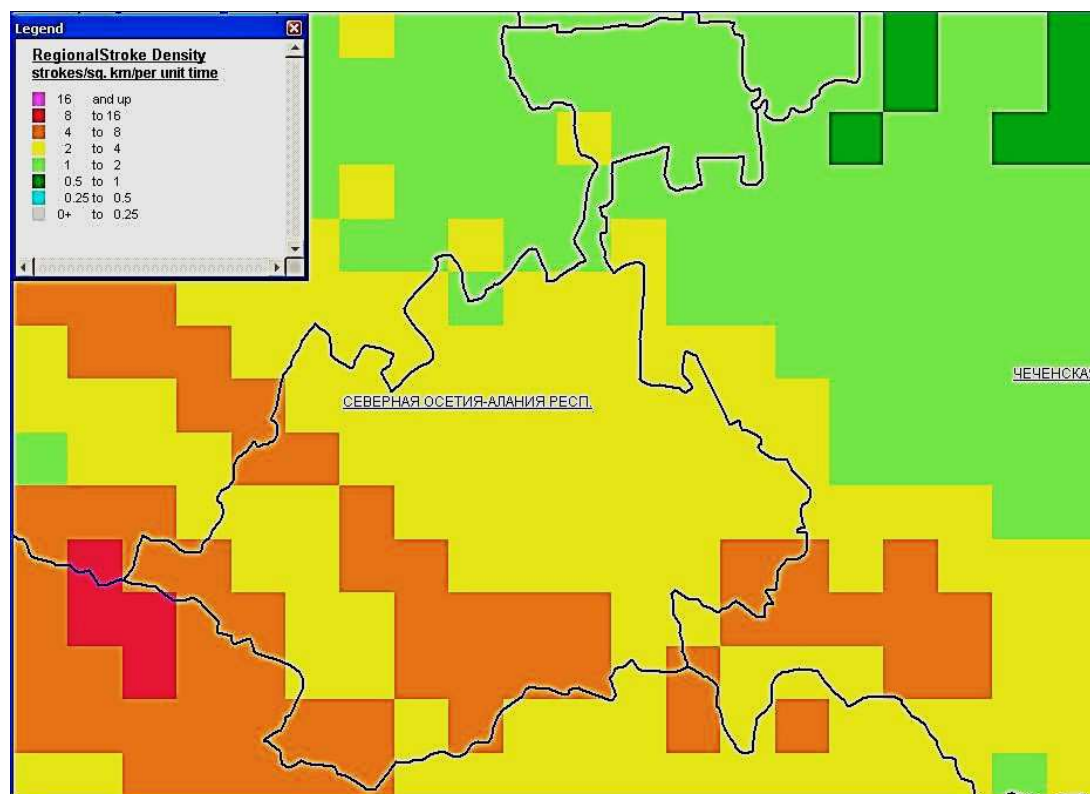


Рис. 5. Плотность грозных разрядов на территории Республики СОА
 / Fig. 5. Density of lightning discharges on the territory of the North Ossetia-Alania Republic

Заключение

В работе выполнен анализ среднегодовых факторов грозовой и молниевой активности на территории Республики Северная Осетия – Алания с использованием данных ГПС ФГБУ «ВГИ». На основе большого числа (103 818) данных по наземным разрядам за исследуемый период показано преобладание отрицательных разрядов (95 757) по сравнению с положительными разрядами (8 061). Наибольшее количество дней с грозой имеет место в летние месяцы: июнь – до 24, август – до 21. Полученное выражение линейного тренда для числа гроз показывает снижение грозовой активности за последние годы на исследуемой территории.

Список источников

1. Аджиев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н. Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 5–11.
2. Аджиев А.Х., Кереева З.М., Кузьмин В.А. Распределение средних значений токов молний различной полярности по субъектам юга России // Успехи современного естествознания. 2021. № 5. С. 123–127.
3. Аджиев А.Х., Юрченко Н.В., Куповых Г.В., Кудринская Т.В. Наблюдения за грозовой активностью и параметрами молниевых разрядов на территории юга европейской части России // Распространение радиоволн : тр. XXVII Всерос. открытой науч. конф. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2021. С. 828–832.
4. Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Гятов Р.А., Кереева З.М. Взаимосвязь числа дней с грозой и продолжительности гроз по данным визуальных и инструментальных наблюдений // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 3. С. 30–36.
5. Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Аджиева А.А., Куповых Г.В., Тумгоева Х.А. Определение параметров молниевых разрядов с использованием грозорегистратора LS8000 // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 3. С. 55–63.
6. Горбатенко В.П. Влияние географических факторов климата и синоптических процессов на грозовую активность: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2003. 39 с.
7. Двали Е.Р. Исследование продолжительности и частоты гроз в зависимости от высоты места над уровнем моря // Тр. Закавказского НИИ. 1973. Вып. 47 (53). С. 47–59.
8. Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Андриевская В.Ю., Юрченко Н.В., Кудринская Т.В., Редин А.А. Мониторинг характеристик грозовой активности на юге европейской части России // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2017. № 4. С. 212–223.
9. Аджиев А.Х., Князева З.М., Думаева Л.В. Анализ грозовой активности на территории Западного Кавказа по данным инструментальных регистраций и наблюдений на метеостанциях // Изв. Кабардино-Балкарского НЦ РАН. 2013. № 3. С. 31–37.
10. Жарашуев М.В. Методика автоматизированного статистического анализа разрядов облако – земля для территории Северного Кавказа // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 111–116.

References

1. Adzhiev A.Kh., Tapaskhanov V.O., Stasenko V.N. Lightning direction finding system in the North Caucasus. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2013;(1):5-11. (In Russ.).
2. Adzhiev A.Kh., Kerefova Z.M., Kuzmin V.A. Distribution of average values of lightning currents of different polarities in the regions of the south of Russia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2021;(5):123-127. (In Russ.).
3. Adzhiev A. Kh., Yurchenko N. V., Kupovykh G. V., Kudrinskaya T. V. Observations of thunderstorm activity and parameters of lightning discharges in the south of the European part of Russia. *Propagation of Radio Waves*. Proceedings of the XXVII All-Russian Open Scientific Conference. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University Press; 2021:828-832. (In Russ.).
4. Adzhiev A.Kh., Kupovykh G.V., Gyatov R.A., Kerefova Z.M. The relationship between the number of days with a thunderstorm and the duration of thunderstorms according to visual and instrumental observations. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2020;(3):30-36. (In Russ.).
5. Adzhiev A.Kh., Kuliev D.D., Adzhieva A.A., Kupovykh G.V., Tumgoeva Kh.A. Determination of lightning discharge parameters using lightning detector LS8000. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2018;(3):55-63. (In Russ.).
6. Gorbatenko V.P. *Influence of geographical climate factors and synoptic processes on thunderstorm activity*. Dissertation Thesis. St. Petersburg, 2003. 39 p. (In Russ.).

7. Dvali E.R. Study of the duration and frequency of thunderstorms depending on the altitude above sea level. *Tr. Zakavkazskogo NII = Proceedings of the Transcaucasian Research Institute*. 1973;(47):47-59. (In Russ.).

8. Adzhiev A.Kh., Kupovykh G.V., Andrievskaya V.Yu., Yurchenko N.V., Kudrinskaya T.V., Redin A.A. Monitoring the characteristics of thunderstorm activity in the south of the European part of Russia. *Izv. YuFU. Tekhn. nauki = Izvestiya SfedU. Engineering Sciences*. 2017;(4):212-223. (In Russ.).

9. Adzhiev A.Kh., Knyazeva Z.M., Dumaeva L.V. Analysis of thunderstorm activity in the Western Caucasus based on instrumental recordings and observations at weather stations. *Izv. Kabardino-Balkarskogo NTs RAN = News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;(3):31-37. (In Russ.).

10. Zharashuev M.V. Methodology for automated statistical analysis of cloud-ground discharges for the territory of the North Caucasus. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2022;(4):111-116. (In Russ.).

Информация об авторах

А.А. Аджиева – доктор физико-математических наук, профессор.

Г.В. Куповых – доктор физико-математических наук, профессор, Инженерно-технологическая академия.

З.М. Кереева – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

Information about the authors

A.A. Adzhieva - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor.

G.V. Kupovykh - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Academy of Engineering and Technology.

Z.M. Kerefova - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Researcher.

*Статья поступила в редакцию 29.06.2023; одобрена после рецензирования 29.08.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 29.06.2023; approved after reviewing 29.08.2023; accepted for publication 30.10.2023.*

Научная статья
УДК 504.05:553.7
doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-70-78

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗЛИВА ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД СКВАЖИНЫ 9-Т КАРГАЛИНСКАЯ

Лиана Саидовна Гацаева

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный, Чеченская Республика, Россия
gls69@yandex.ru

Аннотация. Опираясь на фондовые материалы по месторождению термальных вод Каргалинское и проведенные полевые исследования в районе геотермальной скважины 9-Т Каргалинская (Чеченская Республика), проведено картографирование ареала воздействия изливающихся вод данной скважины и дана комплексная геоэкологическая оценка их воздействия на ландшафт и использование земель. На мезоуровне дана оценка встроенности скважины в региональную ландшафтную структуру (построен профиль, на котором обозначены основные геолого-географические границы и единицы физико-географической дифференциации: типы и группы ландшафтов). На крупномасштабном уровне проведено комплексное картографирование ландшафтов и использования земель в масштабе 1:10 000. В полевых условиях даны характеристики природным комплексам ранга урочищ и фаций (с описанием растительности, почв и актуального использования), проведены замеры температур воды, взяты пробы воды на химический анализ из скважины и котловины грунтовых вод, используемой для капельного полива сельскохозяйственных угодий. Проведены геоботанические исследования флоры с выделением основных фитоценозов, в отдельных точках которых закладывались трансекты (1 м²), определялись доминирующие ассоциации, количество доминантов, общее проективное покрытие.

Ключевые слова: геотермальные ресурсы, термальные воды, скважина, месторождение термальных вод Каргалинское, исследования, излив, ландшафт, воздействие, растительный покров

Для цитирования: Гацаева Л.С. Геоэкологические проблемы излива термальных вод скважины 9-Т Каргалинская // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 70–78.

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

Original article

GEOECOLOGICAL PROBLEMS OF THE OUTFLOW THERMAL WATER WELLS 9-T KARGALINSKAYA

Liana S. Gatsaeva

Ibragimov Complete Research Institute, Russian Academy of Science, Grozny, Chechen Republic, Russia
gls69@yandex.ru

Abstract. Based on stock materials on the Kargalinskoye thermal water deposit and field studies in the area of the geothermal well 9-T Kargalinskaya (Chechen Republic), mapping of the area of impact of the outflowing waters of this well was carried out and a comprehensive geoecological assessment of their impact on the landscape and land use was given. At the mesolevel, an assessment was made of the integration of the well into the regional landscape structure (a profile was built on which the main geological and geographical boundaries and units of physical and geographical differentiation are indicated: types and groups of landscapes). At a large-scale level, a comprehensive mapping of landscapes and land use was carried out on a scale of 1:10 000. In the field, characteristics were given to natural complexes of the rank of tracts and facies (with a description

© Гацаева Л.С., 2023

of vegetation, soils and actual use), water temperatures were measured, and water samples were taken for chemical analysis from a well and a groundwater basin used for drip irrigation of agricultural land. Geobotanical studies of the flora were carried out with the identification of the main phytocenoses, at some points of which transects (1 m²) were laid, dominant associations, the number of dominants, and the total projective cover were determined.

Keywords: *geothermal resources, thermal waters, well, Kargalinskoye thermal water deposit, research, outflow, landscape, impact, vegetation cover*

For citation: *Gatsaeva L.S. Geocological Problems of the Outflow Thermal Water Wells 9-T Kargalinskaya. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2023;(4):70-78. (In Russ.).*

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

Введение

Изучению воздействия изливающихся геотермальных скважин посвящены работы [1–8]. В них дается оценка трансформации экосистем под воздействием термальных вод различной минерализации (повышение концентрации хлоридов, изменение минерализации и смена типов воды, засоление и деградация почв, снижение видов растительных сообществ и др.). В Республике Дагестан, например, бесконтрольный сброс минерализованных вод, в составе которых содержатся нефтепродукты, фенолы, хлориды, различные металлы в концентрациях, значительно превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК), привел к загрязнению некоторых участков прибрежных вод Каспийского моря [6, 7]. В работе [8] дана оценка воздействию изливающихся термальных вод (ТВ) скважины 11-Т Гунюшки (Чеченская Республика) (ЧР) на основные типы ландшафтов, испытавших это влияние. Динамический ряд природных комплексов здесь сформировался под влиянием двух основных факторов: условий увлажнения и деградации почвенно-растительного покрова. Тепловое загрязнение привело к изменению микроклимата, что обусловило специфичность животного и растительного сообществ в районе излива. Например, распыление воды привело к переувлажнению прилегающей территории вплоть до заболачивания, а в результате теплового воздействия ближе к скважине визуально уже прослеживается значительное угнетение видового состава растений и показателей проективного покрытия. В общей сложности из сельскохозяйственного оборота изъято более 120 га земель, причем 13,5 % из них попадают в зону высокой экологической напряженности. Здесь должны проводиться рекультивационные мероприятия по восстановлению ландшафтов.

Цель данной работы – комплексная геоэкологическая оценка воздействия изливающихся ТВ скв. 9-Т Каргалинская на ландшафт и использование земель. Задачами настоящей работы являются: 1) описание скважины с точки зрения ее взаимоотношения с окружающими ландшафтами и вовлечение в использование за разные периоды; 2) оценка прямого и косвенного влияния скважины на вмещающий ландшафт; 3) оценка вариантов использования и выработка рекомендаций к оптимизации нарушенного ландшафта.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены фондовые материалы по термальным скважинам ЧР, результаты полевых исследований, картографирование ареала влияния излива ТВ из скв. 9-Т Каргалинская. Картографирование проводилось на двух масштабных уровнях. На мезомасштабном уровне была дана оценка встроенности скважины в региональную ландшафтную структуру, для чего был построен профиль от Терского массива до долины р. Терек. На профиле обозначены основные геолого-географические границы и единицы физико-географической дифференциации (типы и группы ландшафтов). На крупномасштабном уровне проведено комплексное картографирование ландшафтов и использования земель. В полевых условиях были описаны природные комплексы ранга урочищ и фаций, проведены геоботанические исследования, на химический анализ отобраны пробы воды (из скважины и котловины грунтовых вод (в 300 м восточнее скважины, используется для полива)).

Скважина 9-Т Каргалинская: история и краткая характеристика

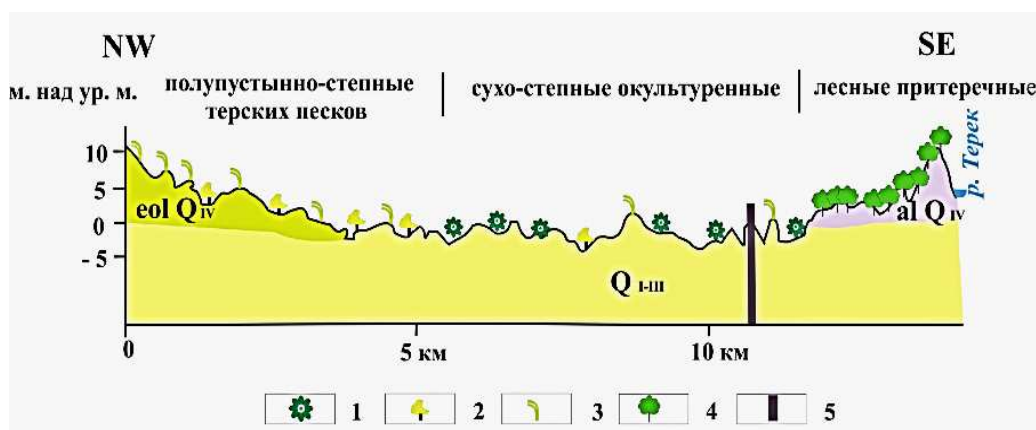
Находится в Шелковском районе ЧР между станицами Курдюковская и Каргалинская. Кроме нее, в пределах месторождения термальных вод (МТВ) Каргалинское пробурено еще 6 скважин (№ 5-Т, 6-Т, 7-Т, 8-Т, 10-Т, 11-Т), находившихся в эксплуатации с 1984 г. [9]. В настоящее время оборудование всех скважин находится в критическом состоянии.

До 90-х гг. XX в. теплотенциал МТВ Каргалинское использовался для теплоснабжения предприятий АПК (винсовхоз, коньячный завод, Терский рыбзавод и др.). Скважины работали в отопительный период. За 1989 г. потребление ТВ составило 1 052 000 м³.

Можно предполагать, что скважины имеют тесную гидродинамическую связь: в 2019 г. после прекращения работы и ликвидации скв. 2-Т на Дубовской площади в районе станицы Бороздиновской произошел самоизлив из аварийной (недействующей) скв. 9-Т Каргалинская. Обе скважины имеют забой в нижнем пласте караганских отложений $N_1^2 kr$ (паспорта скважин). На сегодняшний день потоки воды изливаются на дневную поверхность, часть которых по руслу стока попадает в оросительно-дренажную сеть.

Ландшафты на мезоуровне

Сама скважина и ареал ее воздействия расположены в долине р. Терек между Терским массивом и приречными террасами Терека (рис. 1). Высотные отметки скважины в самом высоком месте достигают 0 м над уровнем моря, а ближайшие понижения – 2–3 м ниже уровня моря. Как видно из профиля, ареал воздействия приурочен к относительно низким отметкам. С севера на юг по профилю верхнечетвертичные отложения элювиальных терских песков сменяются преимущественно среднечетвертичными отложениями из песков, суглинков, глин, реже – песчаников. Рельеф территории грядово-бугристый, глубины понижений достигают несколько метров, определяя большое разнообразие в условиях увлажнения.



Условные обозначения: 1 – сельскохозяйственные поля разной интенсивности; 2 – кустарники в гидроморфных понижениях (ива и др.); 3 – лесные заросли из тополя, дума, карагача, диких плодовых и др.; 4 – степное разнотравье; 5 – геотермальная скважина

Рис. 1. Комплексный физико-географический профиль по линии Терские пески – Терек в районе скважины 9-Т Каргалинская / Fig. 1. Complex physical-geographical profile along the line Tersky sands - Terek in the area of the well 9-T Kargalinskaya

На террасах Терека с более близким залеганием грунтовых вод развиты полупустынно-степные и сухостепные ландшафты, сильно трансформированные долговременной деятельностью человека. Повсеместно видны ирригационные формы рельефа (обводнение), сложенные аллювиальными суглинками под полынно-тамариковыми полупустынными степями на аллювиально-луговых, зачастую с засоленными горизонтами, почвах. В настоящее время наблюдается чередование полей и пастбищ, зачастую сильно стравленных, которые в прошлом были поливными землями виноградников и бахчевых культур. Значительное снижение уровня аграрной освоенности и разрушение системы орошения привели к зарастанию бывших полей полынью, солянками, тамариксом, терном, многочисленными сорными видами (цикорий (*Cichorium*

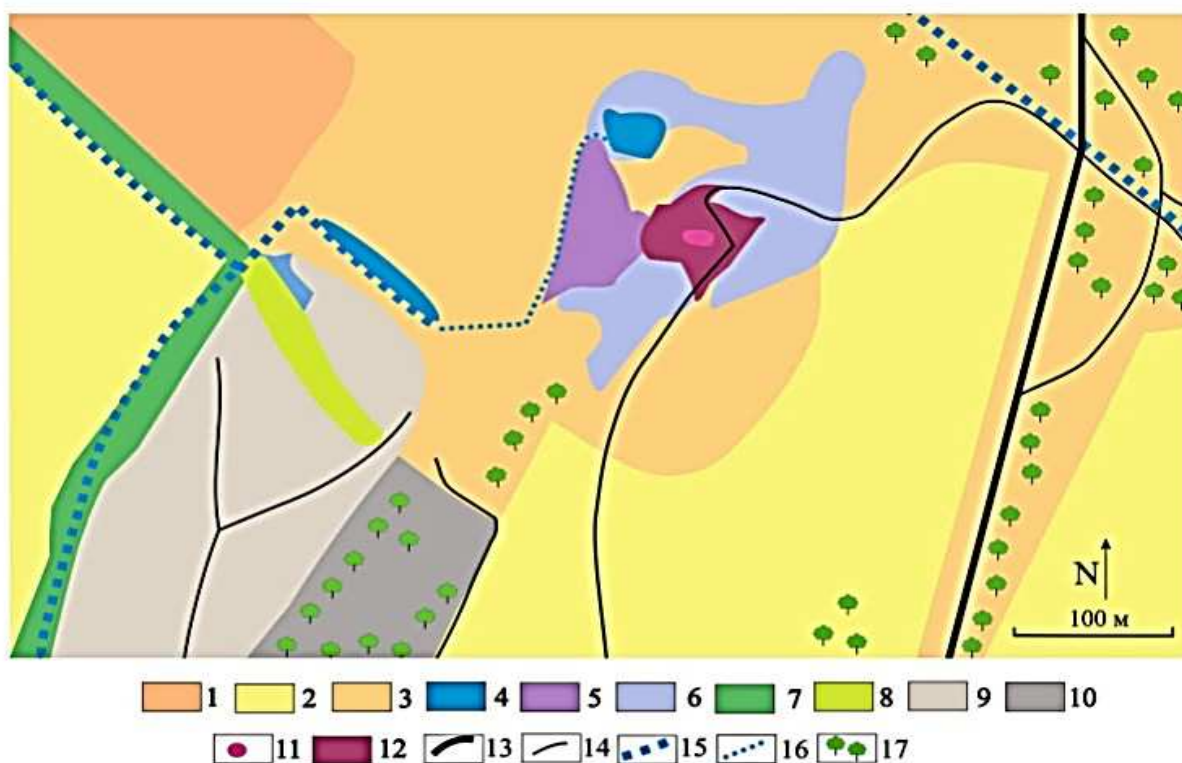
intybus), конский щавель (*Rumex confertus*) и др.). Вдоль русла каналов обычны заросли тростника на лугово-болотных почвах.

Ликвидация коллективной системы хозяйствования привела к существенному изменению культурного ландшафта. Ныне большинство полей представляют пастбища, лишь отдельные участки возделываются под кормовые культуры, в том числе бахчевые. В ряде случаев интенсивное овощное и бахчевое хозяйство ведется китайцами.

Как видно из профиля, ареал воздействия скважины затрагивает полупустынно-степной тип ландшафтов, который в значительной степени изменен долговременной деятельностью человека.

Ландшафты на локальном уровне. Физико-географическую дифференциацию на локальном уровне демонстрирует ландшафтная карта-схема, составленная по материалам полевых исследований (рис. 2).

Как видно из схемы, ландшафтная структура значительно усложнилась вследствие влияния излива ТВ из скважины. Вместо больших полей наблюдается мозаичность распределения природно-антропогенных комплексов. Ареал влияния скважины содержит несколько гетерогенных природных и природно-антропогенных комплексов, находящихся в разной степени трансформации. Наиболее близки к природному состоянию природно-антропогенные и окультуренные ландшафты, занятые под поля с травостоем с выпасом по отаве (ранее – пашни). В природном отношении они представляют собой грядово-бугристые, местами искусственно выположенные поверхности, часть которых используется для выращивания овощей с капельным орошением (1).



Условные обозначения: 1 – выположенные поверхности полей с интенсивным использованием (овощи под пленкой с капельным орошением); 2 – выположенные поверхности полей с экстенсивным нерегулярным использованием (травосеяние плюс выпас); 3 – грядово-бугристые, местами искусственно выположенные поверхности под сеянными травами с выпасом (ранее – пашни); 4 – водоемы, образованные в результате сброса воды из геотермальной скважины; 5 – заболоченные участки с гидроморфной растительностью, образованные вследствие поднятия уровня грунтовых вод вблизи сброса вод из скважины; 6 – поверхности с повышенной увлажненностью с осоковой и другой гидроморфной растительностью; 7 – каналы оросительно-дренажной сети; 8 – прибрежные к водоемам участки с камышовыми зарослями; 9 – ареалы приема и разравнивания строительного грунта (ранее – свалка бытового мусора); 10 – законсервированная свалка бытового мусора с пионерной растительностью и возобновлением лесостепной растительности; 11 – очаг геотермальной скважины, лишенный растительности; 12 – ареал с пионерной растительностью, примыкающий к очагу геотермальной скважины; 13 – магистральные дороги; 14 – полевые дороги; 15 – основные водные каналы; 16 – второстепенные каналы; 17 – участки лесовозобновления

Рис. 2. Карта-схема ландшафтов и использования земель в ареале скв. 9-Т Каргалинская
 / Fig. 2. Schematic map of landscapes and land use in the area of well 9-T Kargalinskaya

Гидроморфный ряд природных комплексов представлен озерами воды со всепогодной положительной температурой около 20–30 °С (4).

Вблизи озерков развиваются природные комплексы с заболоченным почвенно-растительным покровом, здесь также температура водной компоненты слегка повышена (5). И третьими в гидроморфном ряду находятся участки с повышенной увлажненностью с осоковой и другой гидроморфной растительностью (6). В зависимости от сезона площадь этих комплексов может колебаться, что связано с уровнем грунтовых вод. К гидроморфному ряду можно также отнести камышовые заросли в одном из озерков, где вода еще испытывает влияние скважины (8), а также заросли камыша и ежевики вдоль каналов дренажно-оросительной сети (9). Сам очаг скважины представляет собой оголенную поверхность площадью около 30 м². К ней примыкает ареал, в котором встречаются куртины пионерной растительности, наблюдается значительная замусоренность. Воды скважины выливаются в северо-западном направлении, образуя протоки и небольшие озера (рис. 3).



Рис. 3. Скважина 9-Т Каргалинская и водоемы вокруг нее
/ Fig. 3. Well 9-T Kargalinskaya and reservoirs around it

Температура воды в скважине близка к 100 °С. По мере удаления от скважины она опускается, достигая в канаве, соединяющей с дренажно-оросительной сетью, 27 °С (в 70 м от скважины). Таким образом, налицо тепловое и водно-химическое влияние на вмещающий ландшафт.

Другим источником техногенного воздействия является свалка, которая имеет 2 ареала: 1-й – законсервированный участок (10), на который происходил вывоз бытового мусора; 2-й – действующий полигон (9), куда свозят строительный грунт. Первый природно-антропогенный комплекс начал зарастать травянистой и лесостаричной растительностью. По сути, два источника антропогенного воздействия, представленные скважиной и свалкой, смыкаются. Они нарушают природно-антропогенную структуру сельскохозяйственных угодий. Нарушения гидрологического режима, связанного с воздействием скважины, привели к прямому и косвенному влиянию на ландшафт. Наблюдается закустаривание и лесовозобновление, причиной чему также является и снижение интенсивности хозяйственного использования на данной местности.

Геоэкологическая оценка влияния геотермальной скважины на структуру и динамику ландшафтов

С целью изучения состава и определения различных характеристик ТВ, а также выработки рекомендаций по их использованию проводили химический анализ воды. Пробы воды взяты непосредственно из скважины 9-Т Каргалинская и котловины грунтовых вод, используемых для орошения сельхозугодий.

Формула Курлова для ТВ скв. 9-Т Каргалинская выглядит следующим образом [10]:
$$M_{6,3} \frac{Cl_{72-85} HCO_{10-16}^3}{(Na+K)_{74-85} Ca_{9-17}} \text{ рН } 8,2 .$$

Вода относится к хлоридному натриевому типу. В соответствии с Национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 54316-2020 «Воды минеральные питьевые природные» вода скважины 9-Т близка к питьевым лечебно-столовым водам хлоридно-натриевой группы тюменского (скважина 2-Б Тараскульского месторождения) и ниже-сергинского (скважина 4 Нижне-Сергинского месторождения Свердловской области) типа. Температура воды на устье скважины составляет 99,0 °С. Результаты химико-аналитических исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Результаты химического анализа проб воды / Results of chemical analyzes of water samples

Показатель	Норматив качества (ПДК, ПДС, ПДВ)*	Результаты анализа ±Δ		НД на метод анализа
		Скв. 9-Т	Водоем	
Цветность, градус	20	43	52	ПНД Ф 14.1:2:4.207-04
Запах, балл	Не более 2	2,0	–	РД 52.24.496-2005
Нитрат-ионы, мг/дм ³	45	0,15	1,1±0,2	ПНД Ф 14.1:2:4.4-95
Общее железо, мг/дм ³	0,3	0,06	0,2±0,04	ПНД Ф 14.1:2:4.50-96
Общая щелочность, мг/дм ³	–	5,0	4,0±0,4	ГОСТ 31957-2012
Водородный показатель, ед. рН	8,5	8,1	7,7±,02	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97
Общая жесткость, мг-экв/л	7,0	11,0	8,0±0,8	ПНД Ф 14.1:2:3.98-97
Кальций, мг-экв/л	200	8,5	–	ПНД Ф 14.1:2:3.98-97
Магний, мг-экв/л	100	2,5	–	ПНД Ф 14.1:2:3.98-97
Мутность, мг/дм ³	1,5–2,0	1,5–2,0	2,1±0,4	ПНД Ф 14.1:2:3.4.213-05
Хлориды, мг/дм ³	350	3527,2	60,2±5,4	ПНД Ф 14.1:2:3.96-97
Сульфат-ионы, мг/дм ³	500	92,2	177,2±26,6	ПНД Ф 14.1:2.159-2000
Окисляемость перманганатная, мг/дм ³	Не более 5	8,4	1,6±0,1	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99
Сухой остаток, мг/дм ³	1000	5800	304,5±27,4	ПНД Ф 14.1:2:4.114-97
Аммоний-ионы, мг/дм ³	2	6,9	0,3±0,1	ПНД Ф 14.1:2.1-95
Нитрит-ионы, мг/дм ³	3,3	0,031	0,031±0,007	ПНД Ф 14.1:2:4.3-95
Марганец, мг/дм ³	0,1	< 0,01	–	ГОСТ 4974-2014

* ПДК – предельно допустимая концентрация вредных веществ; ПДС – предельно допустимый сброс вредных веществ; ПДВ – предельно допустимый выброс вредных веществ.

Полученные данные по геохимии вод термальной скважины свидетельствуют о непригодности воды для использования в питьевых целях. Значение сухого остатка в пробах воды составляет 5800 мг/дм³. По нормативам СанПиНа (2.1.4.1074-01 «Питьевая вода») показатель сухого остатка не должен превышать 1000 мг/дм³ (в аридных зонах допускается превышение до 1500 мг/дм³). В наших пробах идет 5-кратное превышение сухого остатка [10]. Анализ грунтовых вод показал, что все исследуемые показатели в пределах допустимых ПДК, что свидетельствует о хорошем качестве, но длительное просачивание воды из озерцов вокруг скважины во времени может сильно ухудшить эту картину.

Геоботанические исследования. С целью исследования флоры в зоне разлива ТВ в начале осени 2020–2022 гг. (конец периода вегетации) велись флористические наблюдения. Маршруты проложены с учетом рельефа и уровня воздействия разливающихся ТВ на ландшафты. Для сравнительного анализа закладывались два профиля: I профиль – непосредственно в зоне воздействия ТВ; II – контрольный (рис. 4). Геоботанические исследования проводились с выделением основных фитоценозов, в отдельных точках которых закладывались трансекты (1 м²) и определялись доминирующие ассоциации, количество доминантов, общее проективное покрытие (табл. 2).

Динамический ряд от природных к техногенным комплексам формируется как под влиянием условий увлажнения, так и вследствие изменений в использовании земель и их интенсивности. Условия увлажнения меняются в зависимости от нахождения и перераспределения воды из скважины. Можно выделить три совокупных ареала техногенного воздействия (рис. 5).

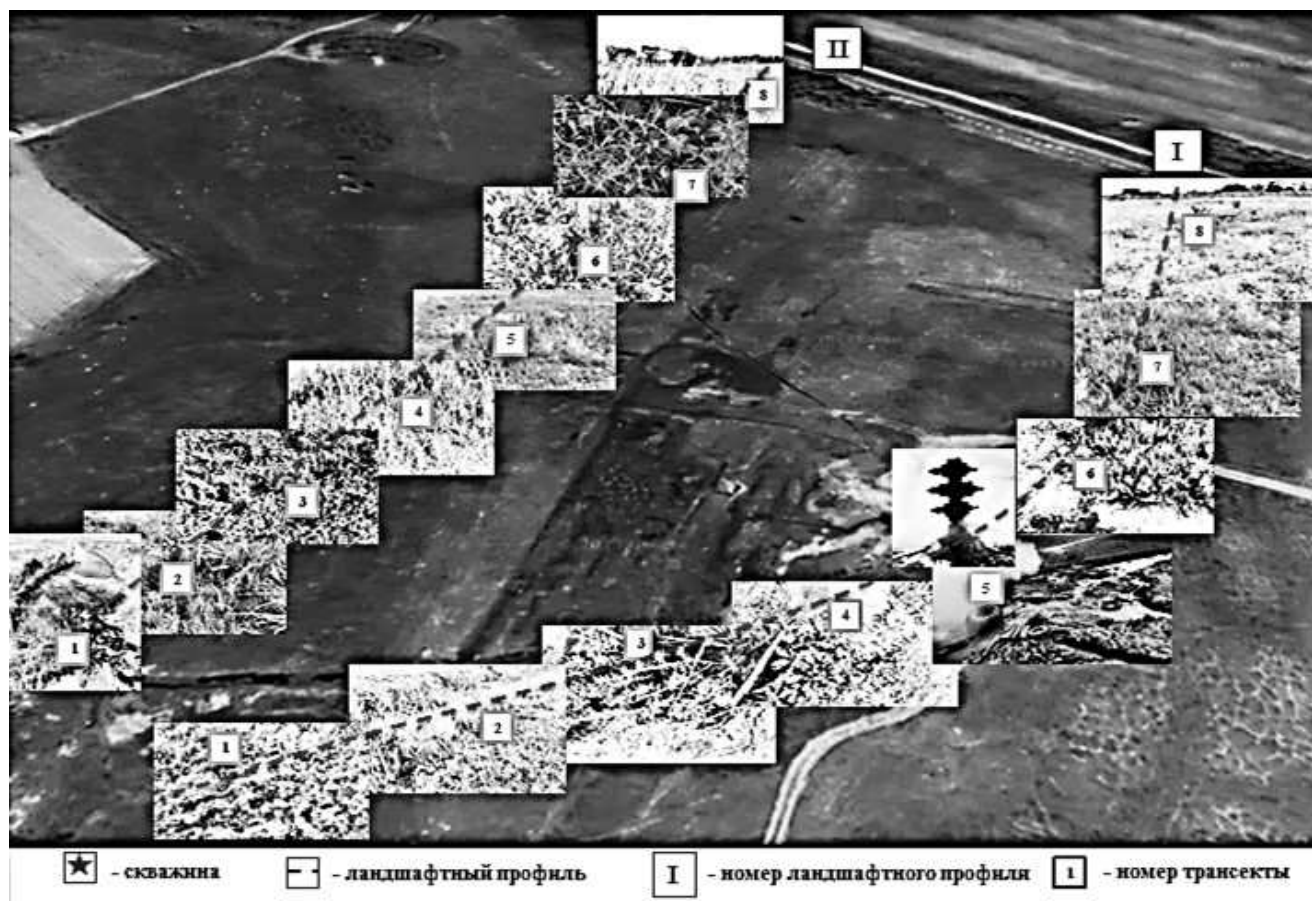


Рис. 4. Карта-схема полевых исследований / Fig. 4. Map-scheme of field research

Таблица 2 / Table 2

Геоботаническое описание трансект / Geobotanical description of transects

	Профиль	Параметр	Номер трансекты							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Скважина 11-Т Каргалинская	I	Проективное покрытие, %	30	40	30	30	0	10	30	20
		Количество видов	2	2	2	1	0	1	2	2
	II	Проективное покрытие, %	40	40	50	50	30	40	60	70
		Количество видов	2	2	3	3	4	5	3	3

Зона А – *прямого и сильного воздействия* – ареал, где непосредственно изливается горячая минерализованная вода. Здесь природные комплексы полностью уничтожены, вместо них формируются техногенные с особым режимом тепла и влаги. Зона В – *прямого и относительно слабого воздействия* – испытывает непосредственное тепловое и гидрохимическое влияние, здесь наблюдается мозаичное распределение растительных группировок и почв. Зона С – *косвенного воздействия* – испытывает косвенное влияние трансформации всей системы землепользования: одни поля перестали существовать из-за близости к скважине, другие потеряли экономический интерес из-за снижения доступности, расчлененности. И, таким образом, из сельскохозяйственного оборота отторгнуто порядка 15 га земель.

Рекультивация и оптимизация использования данной территории зависят прежде всего от того, в каком направлении пойдет дальнейшая эксплуатация скважины и МТВ в целом. При консервации данной скважины (а это самый простой, но не оптимальный вариант) восстановление типичной для данной природной зоны биоты – это дело 2–4 лет. Такие же работы надо проводить и на других скважинах, так как существует гидродинамическая связь между водоносными горизонтами и прорыв можно ожидать в любом месте, что чревато последствиями (некоторые скважины уже очень близко подходят к жилым строениям). После ликвидации разлива потоков ТВ (ликвидация (герметизация) скважины / ремонт устьевого оборудования и целевое использова-

ние) некоторое время следует наблюдать за восстановлением растительного покрова на данной территории. Также необходимо провести работы по расчистке территории от засоренности, планировке и созданию искусственного микрорельефа. Для поднятия плодородия рекомендуется посадка культур, адаптированных к данным условиям и дающих большое количество биомассы.



Рис. 5. Ареалы техногенного воздействия геотермальной скважины 9-Т Каргалинская
 / Fig. 5. Areas of technogenic impact of geothermal well 9-T Kargalinskaya

Заключение

Таким образом, ареал воздействия скв. 9-Т Каргалинская затрагивает полупустынно-степной тип ландшафтов, структура которых значительно усложнилась из-за влияния данной скважины. Наиболее близки к природному состоянию природно-антропогенные и окультуренные ландшафты, занятые под поля с травостоем с выпасом по отаве и также используемые для выращивания грунтовых овощей с капельным орошением.

Сброс воды из скважины может привести к истощению дебита, снижению температуры, деградации данного месторождения в целом. Разлив ТВ даже небольшой минерализации со временем вызывает засоление почвенных горизонтов и может привести к нарушению гидрохимического режима водных систем вблизи фонтанирующих скважин и прилегающих территорий, к ухудшению качества вод горизонтов, служащих источниками питьевого водоснабжения [11]. В нашем случае высока вероятность проникновения изливающихся ТВ в верхние горизонты, служащие источниками питьевого водоснабжения, орошения и пр. Также высок риск попадания в эти же горизонты поллютантов от несанкционированного полигона строительного мусора, организованного без гидроизоляции и соблюдения каких-либо санитарных норм.

С целью предупреждения и минимизации негативных геоэкологических последствий в будущем уже сегодня нужно проводить мероприятия по реконструкции скважины, решить проблему практического использования ТВ (на первых порах хотя бы теплоснабжение (с созданием участков и комплексов для искусственного пополнения запасов), непрерывный мониторинг утечек и др.).

Список источников

1. Сванидзе И.Г., Соромотин А.В. Воздействие геотермальных скважин на водосборы и водные системы гумидных регионов (на примере юга Тюменской области) // Вестн. Тюменского гос. ун-та. 2011. № 12. С. 78–89.
2. Haiyan H. Environmental impact of geothermal development in Henan province, China // Geothermal Training Programme. Report. 2003. Vol. 1. P. 253–274.

3. Junfeng L. Environmental impact of geothermal development in the Isafjardarbaerarea, Iceland // Training Programme. Reykjavik, Iceland, 2004. Vol. 9. P. 160–182.
4. Leynes R., Pioquinto W., Caranto J. Landslide hazard assessment and mitigation measures in Philippine geothermal fields // *Geothermics*. 2005. Vol. 34. P. 205–217.
5. Pashkevich R.I. On environmental aspects of geothermal development // Geothermal Resources Council. September 29 – October 2, 1996. Portland, Oregon: GRC Transactions, 1996. Vol. 20. P. 241–243.
6. Курбанов М.К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука, 2001. 260 с.
7. Курбанова Л.М. Геоэкологические проблемы подземных вод (на примере Махачкалинского геотермального месторождения) // Тр. Ин-та геологии Дагестанского научного центра РАН. 2009. № 55. С. 85–87.
8. Гацаева Л.С., Гуныя А.Н., Керимов И.А. Геоэкологическая оценка влияния геотермальных скважин на ландшафт (на примере месторождения Гуныюшки Чеченской Республики) // Грозненский естественно-науч. бюл. 2022. Т. 7, № 2 (28). С. 18–31.
9. Минерально-сырьевые ресурсы Чеченской Республики / под ред. И.А. Керимова, Е.М. Аксенова. Грозный: Грозненский рабочий, 2015. 512 с.
10. Гацаева Л.С., Гацаева С.С.А. Химический состав геотермальной воды (на примере скважины 9-Т месторождения Каргалинское) // Вузовское образование и наука : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Магас: Ингушский гос. ун-т, 2022. С. 76–85.
11. Гацаева Л.С. Геоэкологические проблемы освоения геотермальных ресурсов Чеченской Республики // Грозненский естественнонауч. бюл. 2017. № 3 (7). С. 17–21.

References

1. Svanidze I.G., Soromotin A.V. Impact of geothermal wells on watersheds and water systems of humid regions (on the elevation of the south of the Tyumen region). *Vestn. Tyumenskogo gos. un-ta = Tyumen State University Herald*. 2011;(12):78-89. (In Russ.).
2. Haiyan H. Environmental impact of geothermal development in Henan province, China. *Geothermal training programme. Report*. 2003;1:253-274.
3. Junfeng L. Environmental impact of geothermal development in the Isafjardarbaerarea, Iceland. *Training programme*. Reykjavik, Iceland, 2004;9:160-182.
4. Leynes R., Pioquinto W., Caranto J. Landslide hazard assessment and mitigation measures in Philippine geothermal fields. *Geothermics*. 2005;34:205-217.
5. Pashkevich R. I. On environmental aspects of geothermal development. *Geothermal Resources Council*. September 29 - October 2, 1996. Portland, Oregon: GRC Transactions Publ.; 1996;20:241-243.
6. Kurbanov M. K. *Geothermal and hydro-mineral resources of the East Caucasus and Ciscaucasia*. Moscow: Nauka Publ.; 2001. 260 p. (In Russ.).
7. Kurbanova L.M. Geoecological problems of groundwater (on the example of the Makhachkala geothermal field). *Tr. In-ta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2009;55:85-87. (In Russ.).
8. Gatsaeva L.S., Gunya A.N., Kerimov I.A. Geoecological assessment of the impact of geothermal wells on the landscape (on the example of the Gunyushki deposit in the Chechen Republic). *Groznenskiy estestvennonauch. byul = Grozny Natural Science Bulletin*. 2022;7(2):18-31. (In Russ.).
9. Kerimov I.A., Aksekov E.M., eds. *Mineral resources of the Chechen Republic*. Grozny: Groznenskiy rabochiy Publ.; 2015. 512 p. (In Russ.).
10. Gatsaeva L.S., Gatsaeva S.S.A. The chemical composition of geothermal water (on the example of well 9-T of the Kargalinskoye deposit). *Higher Education and Science. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Magas: Ingush State University Press; 2022:76-85. (In Russ.).
11. Gatsaeva L.S. Geoecological problems of development of geothermal resources of the Chechen Republic. *Groznenskiy estestvennonauch. byul = Grozny Natural Science Bulletin*. 2017;(3):17-21. (In Russ.).

Информация об авторе

Л.С. Гацаева – научный сотрудник отдела проблем топливно-энергетического комплекса.

Information about the authors

L.S. Gatsaeva - Researcher, Department of Problems of the Fuel and Energy Complex.

Статья поступила в редакцию 02.06.2023; одобрена после рецензирования 30.08.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 02.06.2023; approved after reviewing 30.08.2023; accepted for publication 30.10.2023.

Научная статья

УДК 504.05:553.7

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-79-90

ТЕХНОГЕННЫЕ ШАХТНЫЕ ВОДЫ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РЕЧНЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Евгений Викторович Гибков^{1✉}, *Владимир Евгеньевич Закруткин*²,
*Григорий Юрьевич Скляренко*³, *Виктор Николаевич Решетняк*⁴

^{1, 2, 3, 4} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹irvict@mail.ru✉

²vezak@list.ru

³gysklyarenko@sfnedu.ru

⁴reshetnyak@sfnedu.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований воздействия техногенных шахтных вод (ТШВ) на поверхностные воды и донные отложения малых рек Восточного Донбасса. В химическом составе ТШВ выявлен набор типоморфных микроэлементов (Fe, Mn, Li, Sr), отражающий региональную специфику техногенного процесса их формирования. Особенности поведения железа и марганца в зоне изливов ТШВ проявляются в их быстром выпадении из водной толщи – большая часть (более 95 % Fe и 82 % Mn соответственно) осаждаются до первых 500 м вниз по течению, в то время как процесс осаждения лития и стронция носит более длительный характер, результатом чего является формирование обширных гидрохимических потоков рассеяния этих элементов. Массовое выпадение железа из водной толщи в 500-метровом интервале воздействия ТШВ и закрепление его главным образом в форме устойчивого магнетита способствуют увеличению концентраций металла в донных отложениях в пределах импактной зоны. В распределении марганца, стронция и лития существенную роль играет гранулометрический состав речных осадков, в частности количество пелитовой фракции, в связи с чем они при определенных гидрологических условиях могут активно вовлекаться в механическую миграцию, формируя более протяженные литогеохимические потоки рассеяния в сравнении с железом.

Ключевые слова: техногенные шахтные воды, Восточный Донбасс, поверхностные воды, донные отложения, микроэлементы

Для цитирования: Гибков Е.В., Закруткин В.Е., Скляренко Г.Ю., Решетняк В.Н. Техногенные шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на микроэлементный состав речных вод и донных отложений // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 79–90.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00305, <https://rscf.ru/project/22-27-00305/>, в Южном федеральном университете.

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

Original article

TECHNOGENIC MINE WATERS OF EASTERN DONBASS AND THEIR INFLUENCE ON THE MICROELEMENT COMPOSITION OF RIVER WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS

Eugeny V. Gibkov^{1✉}, Vladimir E. Zakrutkin², Grigory Yu. Sklyarenko³, Victor N. Reshetnyak⁴

^{1, 2, 3, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹irvict@mail.ru✉

²vezak@list.ru

³gysklyarenko@sfnedu.ru

⁴reshetnyak@sfnedu.ru

Abstract. The article presents the results of studies of the technogenic mine waters (TMW) effect on small river waters and sediments within Eastern Donbass. A set of typomorphic trace elements (Fe, Mn, Li, Sr) was identified in the chemical composition of TMW that reflects the regional specificity of the technogenic process of their formation. The behavior features of iron and manganese in the zone of TMW outflows appears in their rapid precipitation from the water column, and the most part of them (more than 95 % of Fe and 82 % of Mn) are deposited up to the first 500 m downstream. Meanwhile the process of lithium and strontium precipitation requires a longer period resulting in the formation of extensive hydrochemical dispersion fluxes of these elements. The mass precipitation of iron from the water column in the 500-meter range of TMW exposure and its fixation, mainly in the form of stable magnetite, contributes to an increase in metal concentrations in bottom sediments within the impact zone. In the distribution of manganese, strontium and lithium, the grain size distribution of river sediments, in particular, the amount of pelite fraction, plays a significant role, and therefore, under certain hydrological conditions, they can be actively involved in mechanical migration, forming longer lithochemical scattering flows in comparison with iron.

Keywords: technogenic mine waters, Eastern Donbass, surface waters, river sediments, trace elements

For citation: Gibkov E.V., Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak V.N. Technogenic Mine Waters of Eastern Donbass and Their Influence on the Microelement Composition of River Waters and Bottom Sediments. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):79-90. (In Russ.).

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-27-00305, <https://rscf.ru/project/22-27-00305/>, at the Southern Federal University.

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

Введение

На протяжении многих лет Восточный Донбасс, расположенный на западе Ростовской области, является одним из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов Российской Федерации. Природный комплекс здесь уже давно подвергается интенсивному техногенному воздействию. При этом основной вклад в осложнение экологической ситуации вносят предприятия угольной промышленности. Самые типичные экологические проблемы углепромышленных районов Восточного Донбасса – это подъем уровня подземных вод, подтопление и заболачивание территории, ухудшение качества воды поверхностных и подземных водных объектов, выделение из выработок токсичных и взрывоопасных газов, активизация микросейсмических явлений, вывод из хозяйственного использования значительных площадей вследствие размещения на них отходов угледобычи, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Важно подчеркнуть, что перечисленные выше экологические проблемы резко обострились в последние 30 лет в связи с реструктуризацией угольной промышленности, которая предусматривала ликвидацию нерентабельных шахт, в основном путем их затопления. Результатом такого подхода стал повсеместный самоизлив высокоминерализованных техногенных вод на дневную поверхность, что оказывало существенное влияние на качество поверхностных вод. При этом

наиболее уязвимыми в силу невысокой самоочищающей способности оказались малые и средние реки. Многие из них практически полностью утратили свои природные функции, стали непригодными для использования не только в питьевых, но и в хозяйственных целях.

Материалы и методы исследования

Для изучения особенностей воздействия техногенных шахтных вод (ТШВ) на речные воды и донные отложения были выбраны участки на реках Малый Несветай (участок № 1), Аюта (участок № 2), Атюхта (участок № 3), Лихая (участок № 4), где происходит разгрузка (излив) ТШВ (рис. 1).

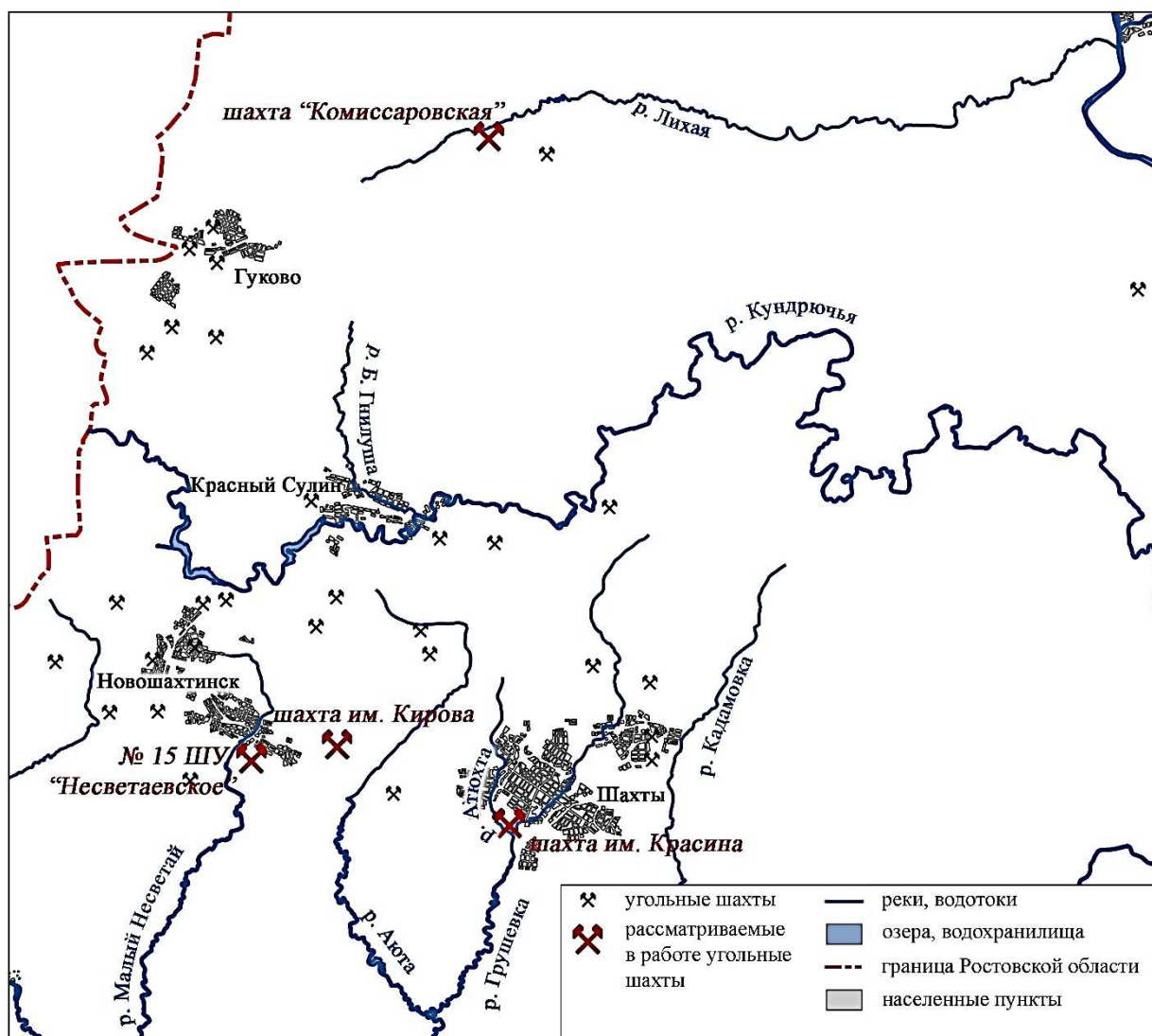


Рис. 1. Схема расположения участков исследований / Fig. 1. Layout of research sites

Выбор был обусловлен тем обстоятельством, что именно здесь представляется возможным выявить прямое влияние ТШВ на поверхностные без промежуточного звена в виде подземных вод территории или водоотливных комплексов.

Участки № 1 и 2 расположены, соответственно, южнее и юго-восточнее г. Новошахтинска в зоне поступления шахтных вод шахты № 15 ШУ Несветайского («Несветайская») в р. Малый Несветай и шахты им. Кирова в р. Аюта. Участок № 3 расположен на юго-восточной окраине г. Шахты, где изливаются воды шахты им. Красина в р. Атюхта. Участок № 4 находится в пределах хуторов Комиссаровка, Тацин и Розет, где шахтные воды ликвидированной шахты «Комиссаровская» поступают в р. Лихая.

Особенности влияния ТШВ на речные воды и донные отложения выявлялись на основе сопоставления геохимических данных в створах наблюдений, располагающихся в 100 и 500 м ниже изливов шахтных вод (нижние створы), а также в 500 м выше по течению рек относительно мест поступления ТШВ в речную сеть (верхние створы). Кроме того, проведены гидрохимические исследования в устьевых створах изучаемых рек, позволяющие выявить особенности поведения элементов за пределами зоны непосредственного влияния ТШВ.

Массив данных по химическому составу шахтных и речных вод, а также донных отложений был получен за период с 2006 по 2022 г. В этом же временном интервале определялись водность исследуемых рек ($\text{м}^3/\text{с}$) и дебиты выходов шахтных вод ($\text{дм}^3/\text{ч}$). Объем поступления шахтных вод и их химический состав позволили установить величину годового поступления ($\text{т}/\text{год}$) химических элементов в речную сеть.

Результаты и обсуждение

Шахтные воды, как техногенная генетическая разновидность подземных вод, формировались в горных выработках на протяжении длительного времени за счёт окисления минералов (преимущественно сульфидов), связанных с углями и вмещающими породами. Шахты им. Красина, им. Кирова и «Несветайская» введены в эксплуатацию в конце 1920-х – начале 1930-х гг., а шахта «Комиссаровская» – с конца 1940-х гг. Выработанное, занимаемое ими пространство в условиях постоянного притока воды способствовало не только аэрации глубокозалегающих горизонтов, но и увеличению площади окисляемой поверхности. Ситуация ещё более усугубилась после закрытия шахт «мокрым способом» – их затопления, разрушения крепи и обрушения кровли пластов, так как формируемые в результате зоны трещиноватости многократно превышают мощность пустот, достигая десятков метров [1].

Химический состав ТШВ, как видно из данных табл. 1, отличается высокой минерализацией (от 5 до 11 г/л), преимущественно кислой, реже нейтральной средой, значительным содержанием сульфат-ионов, в меньшей степени – гидрокарбонат- и хлорид-ионов. Среди главных катионов превалируют натрий, калий, кальций и магний.

Среди представленных в табл. 1 восьми микроэлементов типоморфными, определяющими гидрохимическую специализацию ТШВ, являются железо, марганец, стронций и литий. Они распространены повсеместно и характеризуются высокими коэффициентами концентраций, что, видимо, является следствием взаимодействия шахтных вод с угленосными отложениями в горных выработках. Для остальных четырех элементов (Al, Cu, Cd, Be) отмечаются единичные случаи превышения в шахтных водах фоновых гидрохимических параметров.

Следует отметить, что выделенные типоморфные микроэлементы обладают разной степенью токсичности. Из них наибольшей гидротоксичностью (по В.В. Иванову) обладают литий и особенно стронций (T_r , соответственно, 10 и 50). При этом, как известно [2], важнейшее биохимическое значение придается соотношению Ca/Sr в водах: сравнительно низкие величины этого отношения (менее 100) могут явиться причиной урвской эндемии (поражение костно-суставной системы, атрофия мышц, искривление позвоночника, низкорослость). В ТШВ Восточного Донбасса величина этого отношения изменяется от 36 до 80, что при смешении их с речными может вызвать неблагоприятные последствия для живых организмов, включая человека. Что касается железа и марганца, то, несмотря на их относительно невысокую токсичность, совместное поступление в организм этих металлов может также привести к ряду негативных реакций [3].

Железо в большинстве случаев является основным микрокомпонентом шахтных вод региона. Его содержание в ТШВ шахт им. Красина, им. Кирова и «Несветайская» составляет 30–40 мг/л. Количество марганца для этих объектов находится в пределах 10–16 мг/л, а стронция – 8–10 мг/л. Резко отличается состав воды шахты «Комиссаровская», где содержание железа часто превышает 400 мг/л, а марганца – 30 мг/л на фоне роста кислотности за счет сульфат-ионов, концентрация которых достигает 6,8 г/л, а pH – 6,1. На всех четырех участках железо и сульфаты, как отмечалось выше, являются продуктами выщелачивания сульфидов, растворения сульфатов и органической серы [4], но особенности миграции этих элементов, видимо, отличаются. Так, в водах на участке № 4 отмечается низкая корреляция содержания железа с сульфат-ионами и высокая (до 73 %) концентрация закисной его формы. А на участках № 1, 2 и 3 закисное железо в

пробах редко достигает 15 % от общего его содержания, но есть значимая положительная корреляционная связь Fe с кислотностью (снижением pH) шахтных вод и сульфат-ионами. Пример шахты «Комиссаровская» может иллюстрировать интенсивное окисление самородной серы, входящей в состав углей, сульфатов и сульфидов, и формирование устойчивых сульфат-ионов. В силу недостатка кислорода в затопленных горных выработках железо в шахтной воде окисляется медленнее и мигрирует в закисной форме и в виде сульфата. В шахтах им. Красина, им. Кирова и «Несветайская» процессы выщелачивания минералов стабилизируются, а степень окисления компонентов шахтных вод возрастает, что может быть объяснено большей длительностью работы этих предприятий и эволюцией гидрохимической ситуации, которую отмечал А.И. Гавришин [5]. Также влияние может оказывать разница в содержании серы в углях, которое для Восточного Донбасса может колебаться в пределах от 0,3 до 1,8 г/т [6].

Таблица 1 / Table 1

**Химический состав шахтных вод исследуемых участков, мг/л
/ Chemical composition of mine waters within the study areas, mg/l**

Химический состав	Шахта					
	Красина	Кирова	15 ШУ	«Комиссаровская»	Гидрохимический фон бассейна Тузлова [7]	Гидрохимический фон бассейна Северского Донца [7]
pH	7	6,6	6,6	6,1		
Na+K	1322,2	759,3	1086,5	1344,2	242	129
Ca	328,8	392,8	475,7	519,5	149	151
Mg	254,9	294,5	406,3	805,1	71	30
HCO ₃	886,5	794,9	702,3	494,9		
Cl	457,6	199,9	313,2	155,4	203	30
SO ₄	3017	2663	3831	6822	982	261
Минерализация	6210	5104	6890	10936	1983	1112
Fe общ	<u>35,3</u> 135,9	<u>43,8</u> 168,5	<u>9,5</u> 36,4	<u>426,8</u> 1707,4	0,26	0,25
Fe закис	6	13,6	н/о	313,9		
Mn	<u>3,36</u> 84,1	<u>9,45</u> 236,3	<u>16,05</u> 401,3	<u>29,17</u> 224,4	0,04	0,13
Sr	<u>9,12</u> 3,9	<u>9,39</u> 4,1	<u>8,33</u> 3,6	<u>6,49</u> 3,8	2,31	1,35
Al	<u>1,42</u> 6,5	<u>0,08</u> 0,4	<u>0,14</u> 0,6	<u>0,06</u> 0,4	0,22	0,14
Li	<u>0,22</u> 10,8	<u>0,17</u> 8,4	<u>0,07</u> 3,4	<u>0,13</u> 8,6	0,02	0,015
Cu	<u>0,004</u> 1,0	<u>0,0018</u> 0,9	<u>0,005</u> 2,5	<u>0,002</u> 0,8	0,002	0,002
Cd	<u>0,00047</u> 1,6	<u>0,00027</u> 0,9	<u>0,00013</u> 0,4	<u>0,0004</u> 1,0	0,0003	0,0004
Be	<u>0,0007</u> 1,0	<u>0,0005</u> 0,7	<u>0,0004</u> 0,5	<u>0,0009</u> 3,0	0,0007	0,0003

Примечание. В числителе – содержание микроэлементов в ТШВ; в знаменателе – коэффициент концентрации по отношению к фоновым параметрам соответствующего речного бассейна.

Марганец в значительных количествах (максимально – до 661 г/т, чаще – до 180 г/т) встречается как в углях, так и во вмещающих породах Восточного Донбасса: отмечается высокое содержание этого элемента в породах кровли и подошвы угольного пласта k₂, разрабатывавшегося всеми рассматриваемыми в рамках настоящей статьи шахтами [8]. Среднее содержание марганца в ТШВ этих предприятий колеблется в широких пределах от 3,4 до 29,2 г/л (см. табл. 1). Максимальные значения характерны для шахт «Комиссаровская» и «Несветайская», где прослеживается сильная корреляционная связь со стронцием и количеством сульфат-ионов, в соединении с которыми, очевидно, эти элементы мигрируют в шахтных водах.

Как отмечал Я.Э. Юдович, среднее содержание стронция в углях Восточного Донбасса составляет 425 г/т, а в пределах Шахтино-Несветайской синклинали достигает 873–3000 г/т [9]. Причиной этого он вслед за Ф.Ф. Таранушичем [10] счёл широкое развитие здесь интрузий среднего и основного состава и обогащения углей этим элементом благодаря гидротермальным потокам – как результат продолжения магматического процесса. Более высокое содержание стронция (в среднем до 9,1 мг/л) в водах шахт «Несветайская», им. Кирова и им. Красина, расположенных на южном крыле этой структуры, по сравнению с водами шахты «Комиссаровская» (6,49 мг/т) подтверждает эту гипотезу.

Содержание лития в углях Восточного Донбасса варьирует в пределах 2,5–11,3 г/т [8], что сопоставимо либо ниже кларковых его содержаний в каменных углях – 14 г/т, по данным М.П. Кетрис [9]. Несмотря на то что литий является одним из типоморфных микроэлементов шахтных вод, Я.Э. Юдовичем он отнесен к «слабо или умеренно углефильным элементам». По-видимому, выщелачивание Li происходит из глинистых и слюдяных минералов, широко распространенных в углевмещающих отложениях, а вариации его содержаний в шахтных водах иллюстрируют степень нарушенности породного массива и, соответственно, площади контактирующей с водой поверхности.

Как отмечалось ранее, оценка влияния ТШВ на речные системы осуществлялась путем сравнения изменений концентраций типоморфных микроэлементов в воде и донных отложениях в створах, расположенных выше и ниже по течению от мест поступления ТШВ (табл. 2, 4).

Таблица 2 / Table 2

Изменение концентраций микроэлементов в речных водах в зоне воздействия ТШВ, мг/л
/ Variations in the trace elements concentration in river waters within the area affected by TMW, mg/l

Исследуемый участок (река)	Расстояние, м	pH	Fe	Mn	Li	Sr
Участок 1 (М. Несветай)	100	$\frac{8,17}{6,78}$	$\frac{0,33}{6,41}$ (19,4)	$\frac{0,06}{4,93}$ (82,2)	$\frac{0,09}{0,19}$ (1,8)	$\frac{4,41}{10,15}$ (1,8)
	500	$\frac{8,17}{7,92}$	$\frac{0,33}{0,47}$ (1,4)	$\frac{0,06}{0,22}$ (3,7)	$\frac{0,09}{0,15}$ (1,7)	$\frac{4,41}{5,9}$ (1,3)
Участок 2 (Аюта)	100	$\frac{8,15}{7,23}$	$\frac{0,71}{29,7}$ (41,8)	$\frac{0,14}{4,08}$ (29,2)	$\frac{0,17}{0,38}$ (2,2)	$\frac{5,0}{7,7}$ (1,5)
	500	$\frac{8,15}{7,74}$	$\frac{0,71}{0,63}$ (0,9)	$\frac{0,14}{0,74}$ (5,3)	$\frac{0,17}{0,25}$ (1,4)	$\frac{5,0}{6,23}$ (1,3)
Участок 3 (Лихая)	500	$\frac{8,03}{7,63}$	$\frac{0,53}{0,55}$ (1,04)	$\frac{0,18}{1,7}$ (9,4)	$\frac{0,033}{0,043}$ (1,3)	$\frac{1,49}{1,79}$ (1,2)
Участок 4 (Атюхта)	500	$\frac{7,99}{7,87}$	$\frac{0,46}{0,41}$ (0,9)	$\frac{0,31}{0,65}$ (2,1)	$\frac{0,017}{0,082}$ (4,8)	$\frac{3,31}{6,91}$ (2,1)

Примечание. В числителе – концентрация в створе выше сброса шахтных вод; в знаменателе – ниже сброса; в скобках – коэффициент концентрации по отношению к верхнему створу.

Как видно из представленных данных, изменение состава речных вод в створах, наименее удаленных (100 м) от мест поступления в них шахтных вод, для разных элементов проявляется неоднозначно. С одной стороны, это резкое увеличение содержания железа и марганца (соответственно, до 41 и 82 раз), с другой – слабый прирост концентраций лития и стронция (в 2,2 и 1,8 раза соответственно). При этом изменение содержания железа и марганца коррелирует с их распределением в шахтных водах: самый высокий прирост марганца фиксируется при воздействии железисто-марганцевых ТШВ, а железа – марганцево-железистых.

По мере удаления от зон непосредственного влияния ТШВ поведение элементов изменяется, поскольку снижается роль объемов поступающих загрязняющих веществ и в большей степени проявляется влияние других не менее важных факторов – миграционной способности элементов и водности рек. Как показали наши расчеты коэффициентов водной миграции (K_v) с использованием кларков изученных элементов в речных водах [11] и земной коре [12] при средней минерализации речных вод 120 мг/л, микроэлементы образуют следующий ряд:

Sr (K_b 1,4) > Li (0,8) > Mn (0,3) > Fe (0,01). Как видно из табл. 2 и рис. 2, подавляющая масса железа как наименее подвижного элемента прекращает миграцию и осаждается в первых 500 м от мест поступления ТШВ в речную сеть.

Ниже по течению, вплоть до устья (рис. 2), содержание Fe практически не меняется, оставаясь близким к тому, которое было зафиксировано в верхнем створе. Таким образом, гидрохимический поток рассеяния железа характеризуется относительно небольшой протяженностью.

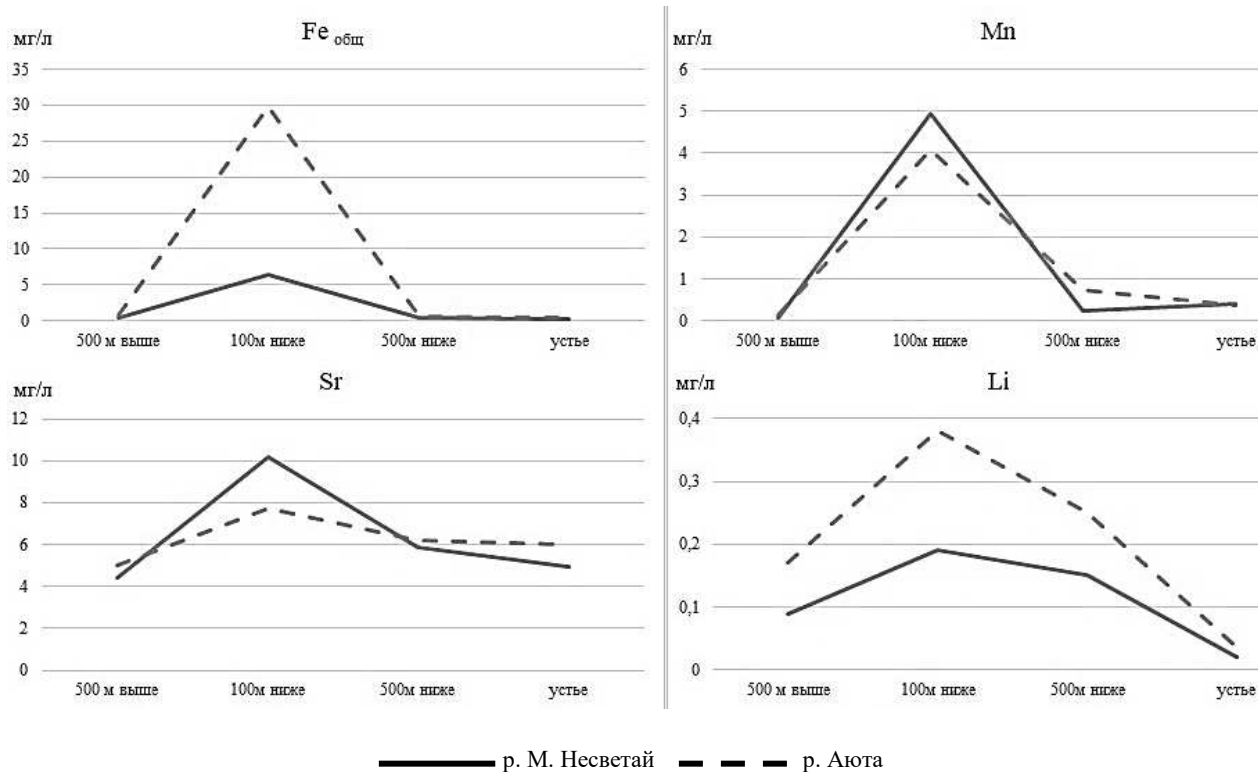


Рис. 2. Изменение концентраций Fe, Mn, Li и Sr в верхних и нижних створах и в устьевой зоне р. М. Несветай и р. Аюта, мг/л / Fig. 2. Concentrations variation of Fe, Mn, Li and Sr within the upper and lower sites and in the river Malyy Nesvetay and Ayuta mouth areas, mg/l

Поведение марганца в зоне непосредственного влияния ТШВ, как и следовало ожидать, в значительной степени напоминает поведение железа, поскольку основная его часть мигрирует в виде малоподвижной гидроокиси Mn^{4+} и соосаждается одновременно с гидрооксидами Fe^{3+} .

Однако в отличие от железа в отдельных реках Восточного Донбасса (например, в р. М. Несветай) отмечается увеличение концентрации Mn к устьевому створу (рис. 2), что может быть связано со вторичным загрязнением водной среды этим элементом за счет поступления его из донных отложений. Более высокая степень десорбции марганца в сравнении с другими элементами, в частности с железом, литием и стронцием, установлена в ходе ранее проведенного лабораторного эксперимента, где в качестве объекта исследования были использованы донные отложения и речные воды именно р. М. Несветай [13].

Что касается стронция и лития, то распределение их содержаний по створам рек отличается от предыдущих двух элементов. Поскольку миграционная способность Sr и Li выше, чем железа и марганца, то они значительно дольше сохраняются в водной среде, не осаждаясь на дне водотока. Об этом свидетельствует рис. 3, где в виде гистограмм показана оставшаяся в речной воде часть элементов (после попадания в донные отложения) в нижнем 500-метровом створе по отношению к 100-метровому створу.

Выявлено существенное превосходство в этом плане стронция и лития в сравнении с железом и марганцем. Так, в частности, если в дальнейшей миграции участвуют всего лишь 2,1–4,3 % Fe и 4,5–18,1 % Mn, то для Sr и Li эти величины достигают 58,1–68,9 и 65,8–78,9 % соответственно. Естественно, что литий и особенно стронций будут формировать более протяженные в сравнении с предыдущей парой элементов гидрохимические потоки рассеяния.

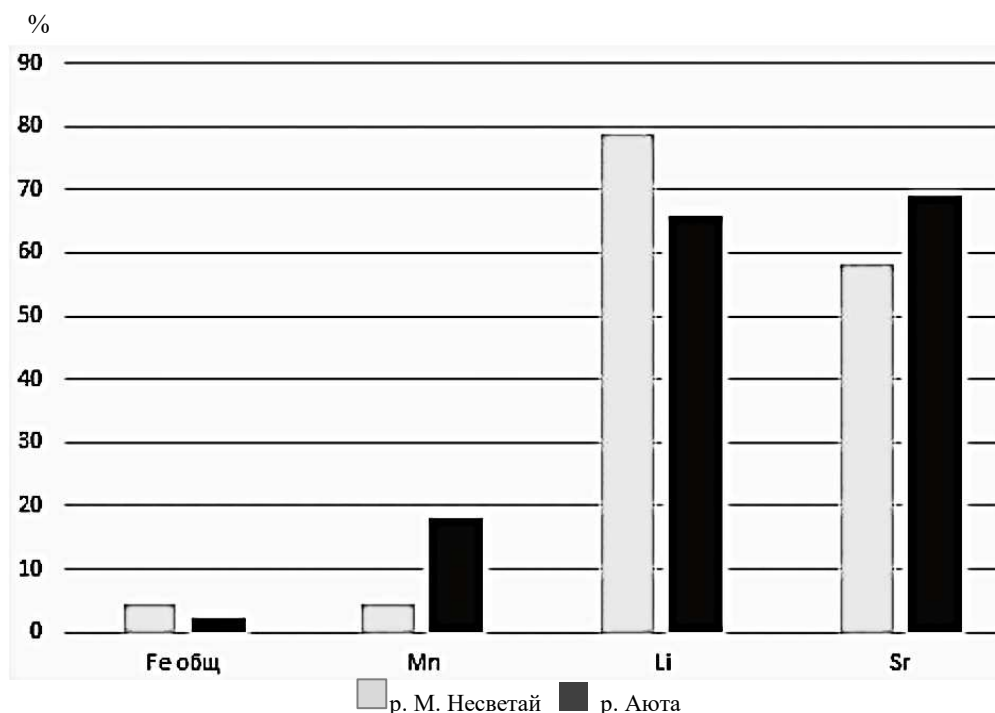


Рис. 3. Остаточная доля типоморфных микроэлементов, мигрирующих в речной воде в нижнем 500-метровом створе в сравнении с менее удаленным от мест поступления ТШВ 100-метровом створе, % / Fig. 3. Residual proportion of typomorphic trace elements migrating in river water at the lower 500-meter site in comparison with those at the 100-meter site less remote from the places of technogenic mine water outflow, %

Немаловажным фактором, влияющим на содержание элементов в речных водах, является, как известно, водность рек. Она в наибольшей степени сказывается на распределении стронция и лития как наиболее подвижных среди изученных типоморфных микроэлементов. Так, в частности, как видно из данных табл. 2 и 3, при близких объемах поступления Sr и Li в реки Атюхта и Аюта прирост концентраций сильнее всего (в 2,3 раза – для стронция и в 4,8 – для лития) выражен в наименее полноводной Атюхте и существенно в меньшей степени (в 1,3 и 1,4 раза соответственно) в наиболее полноводной р. Аюте.

Таблица 3 / Table 3

Водность рек и объемы загрязняющих веществ, поступающих с ТШВ в речную сеть, т/год / Stream discharge of rivers and volumes of pollutants entering the river network from the TMW, tons per year

Исследуемый участок (река)	Водность реки, м ³ /с	Mn	Fe	Li	Sr	Всего
Участок 1 (М. Несветай)	0,19	19,4	11,4	0,08	10,1	40,98
Участок 2 (Аюта)	0,40	9,9	46,1	0,18	9,9	66,05
Участок 3 (Лихая)	0,38	30,7	448,7	0,14	6,8	486,32
Участок 4 (Атюхта)	0,13	3,5	37,2	0,23	9,6	50,5

Как отмечалось выше, определенное количество изученных микроэлементов выпадает из водной толщи, переходя в донные отложения. Последние, как известно, являются, с одной стороны, депонирующей средой, позволяющей проследить динамику загрязнения водной среды за длительный период техногенного воздействия, а с другой – потенциальным источником вторичного загрязнения речных вод при изменении гидрологического режима. Воздействие ТШВ на речные

отложения Восточного Донбасса проявляется главным образом в увеличении содержаний железа, что отмечается на всех без исключения участках исследования (табл. 4). Причем, как и в случае с поверхностными водами, максимальный рост его концентраций отмечается в створах, наименее удаленных вниз по течению от мест поступления ТШВ в речную сеть. Однако степень прироста количества данного металла в донных отложениях в сравнении с верхними створами существенно меньше, чем в речных водах. И это понятно, поскольку известно, что изначальные объемы металлов, в том числе и железа, в донных отложениях существенно превосходят их объемы в водной толще большинства рек [14]. Кроме того, стоит обратить внимание на относительно слабое изменение содержания железа в донных отложениях при сравнении между собой нижних створов.

Таблица 4 / Table 4

**Изменения валовых концентраций элементов в донных отложениях в зоне воздействия ТШВ, мг/кг
/ Variations in total concentrations of elements in river sediments within the zone of TMW influence, mg/kg**

Исследуемый участок (река)	Расстояние, м	Fe	Mn	Li	Sr
Участок 1 (М. Несветай)	100	$\frac{16700}{32900}$ (2,0)	$\frac{1408}{1680}$ (1,2)	$\frac{60}{60}$ (1,0)	$\frac{300}{350}$ (1,17)
	500	$\frac{16700}{30100}$ (1,8)	$\frac{1408}{1450}$ (1,03)	$\frac{60}{60}$ (1,0)	$\frac{300}{300}$ (1,0)
Участок 2 (Аюта)	100	$\frac{36300}{55300}$ (1,5)	$\frac{1387}{1520}$ (1,1)	$\frac{50}{50}$ (1,0)	$\frac{400}{300}$ (0,75)
	500	$\frac{36300}{50100}$ (1,4)	$\frac{1387}{710}$ (0,5)	$\frac{50}{50}$ (1,0)	$\frac{400}{200}$ (0,5)
Участок 3 (Лихая)	500	$\frac{40300}{43600}$ (1,1)	$\frac{1498}{2536}$ (1,7)	$\frac{60}{60}$ (1,0)	$\frac{400}{400}$ (1,0)
Участок 4 (Атюхта)	500	$\frac{26600}{34300}$ (1,3)	$\frac{448}{1736}$ (3,9)	$\frac{60}{80}$ (1,3)	$\frac{300}{300}$ (1,0)

Примечание. В числителе – содержание элементов в верхнем створе; в знаменателе – в нижних створах; в скобках – коэффициент концентрации по отношению к верхнему створу.

Как известно, донные отложения являются динамической средой, и часть слагающего их материала перемещается вниз по течению рек при определенных гидрологических условиях, что, естественно, влияет на перераспределение химических элементов в речном аллювии. В результате этого происходит выравнивание содержания Fe в 500-метровой зоне воздействия ТШВ и формирование более протяженных литогеохимических потоков данного элемента (выходящих за пределы 500-метровой зоны) в сравнении с его гидрохимическими потоками.

Остальные элементы, в отличие от железа, которое уже на ранней стадии диагенеза формирует устойчивые собственные минералы в виде магнетита и в меньшей степени пирита [15], главным образом связаны с пелитовой фракцией. Это хорошо видно на рис. 4, где увеличение в осадке доли пелитовой фракции сопровождается ростом концентраций Mn, Sr и Li.

Преимущественная связь этих элементов с пелитовой фракцией предполагает их активную вовлеченность в миграционный процесс во время взмучивания осадков при изменении гидрологических условий, что сопровождается формированием еще более протяженных по сравнению с железом литогеохимических потоков рассеивания.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Содержание изученных микроэлементов в речных водах Восточного Донбасса зависит от объемов поступления с ТШВ, их миграционной способности и водности рек. Влияние объемов в наибольшей степени проявляется на удалении до 100 м от мест поступления металлов в речную сеть, далее по течению реки все большую роль играют два других фактора.

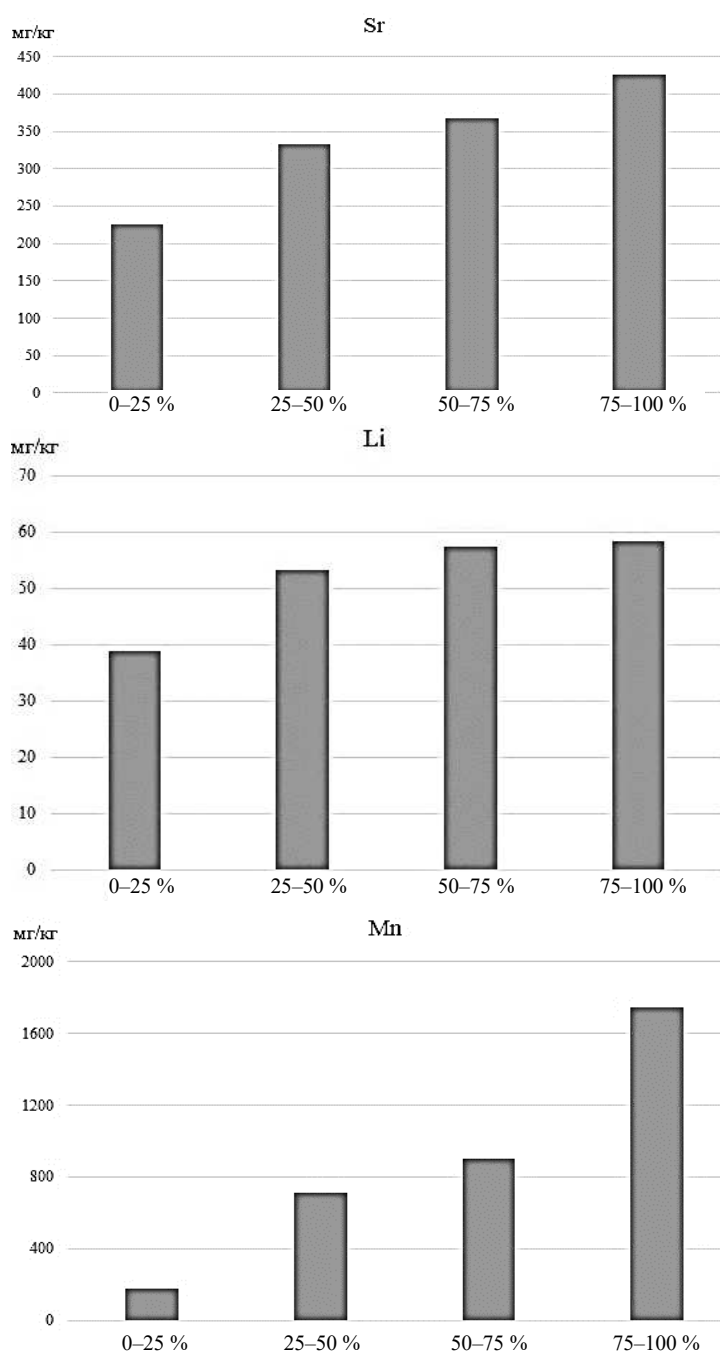


Рис. 4. Средняя концентрация Sr, Li и Mn в пробах донных отложений рек Восточного Донбасса с различной долей пелитовой фракции / Fig. 4. Average concentration of Sr, Li and Mn in samples of river sediments in Eastern Donbass with different share of pelitic fraction

2. Типоморфные элементы ТШВ отличаются друг от друга по степени миграционной способности. При этом наибольшая подвижность лития и особенно стронция способствует формированию наиболее протяженных гидрохимических потоков рассеивания этой пары элементов по сравнению с марганцем и тем более с железом. Следовательно, именно гидрохимические потоки Sr и Li являются наиболее информативными при выявлении скрытых мест поступления ТШВ в речную сеть.

3. Массовое выпадение железа из водной толщи в 500-метровом интервале воздействия ТШВ и закрепление его главным образом в форме устойчивого магнетита способствуют увеличению концентраций металла в донных отложениях в пределах импактной зоны. В распределении марганца, стронция и лития существенную роль играет гранулометрический состав речных осадков, в частности количество пелитовой фракции, в связи с чем они при определенных гидрологических условиях могут активно вовлекаться в механическую миграцию, формируя более протяженные лито-геохимические потоки рассеивания в сравнении с железом.

4. Изученные типоморфные микроэлементы отличаются повышенной гидрохимической токсичностью, особенно при их совместном влиянии на живые организмы, включая человека. Данное обстоятельство необходимо учитывать при использовании речных и взаимодействующих с ними подземных вод для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения.

Список источников

1. Мохов А.В. О гидрогеохимической структуре водного объекта в затопленных выработках каменноугольных шахт // Докл. АН. 2012. Т. 445, № 3. С. 324–326.
2. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов : в 6 кн. Кн. 1: S-элементы / под ред. Э.К. Буренкова. М.: Недра, 1994. 304 с.
3. Королев А.А., Моденова О.А. Оценка токсичности марганца и железа при раздельном и совместном поступлении в организм // Гигиена и санитария. 1991. № 11. С. 15–17.

4. Гавришин А.И. Закономерности формирования химического состава шахтных вод и их влияние на геоэкологическую ситуацию (ш. «Комиссаровская», Восточный Донбасс) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 6. С. 505–513.
5. Гавришин А.И. Шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на состав подземных и поверхностных вод региона // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 5. С. 555–565.
6. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2002. 296 с.
7. Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Бакаева Е.Н. Гидроэкологические особенности поверхностных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса // Изв. РАН. Серия геогр. 2020. № 3. С. 451–460.
8. Левченко С.В. Геологические условия формирования и комплексное использование металлоносных углей Восточного Донбасса : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов н/Д., 2012. 24 с.
9. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург : Ин-т геологии Коми науч. центра УрО РАН, 2005. 654 с.
10. Таранушич Ф. Ф. Элементы-примеси в углях Восточного Донбасса // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 1. С. 97–103.
11. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace Elements in River Waters // Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier, 2014. P. 195–235.
12. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2009. 381 с.
13. Решетняк О.С., Закруткин В.Е. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 4 (192). С. 102–109.
14. Солдатова Е.А., Гусева Н.В. Исследование процессов перераспределения химических элементов в системе вода – донные отложения водотоков Томь-Яйского междуречья // Подземная гидросфера : материалы Всерос. совещания по подземным водам востока России. Иркутск: Географ, 2012. С. 246–249.
15. Закруткин В.Е., Решетняк В.Н., Попов Ю.В. Распределение и минеральные формы железа в речных отложениях Восточного Донбасса // 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. 89–95.

References

1. Mokhov A.V. The Hydrogeochemical Structure of Water Bodies in Flooded Openings of Coal Mines. *Doklady Earth Sciences*. 2012;445(1):903-905.
2. Ivanov V.V. *Ecological geochemistry of elements*: in 6 books. Book 1: S-elements. Ed. E.K. Burenkov. Moscow: Nedra Publ.; 1994. 304 p. (In Russ.).
3. Korolev A.A., Modenova O.A. Assessment of the toxicity of manganese and iron during separate and joint intake into the body. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 1991;(11):15-17. (In Russ.).
4. Gavrishin A.I. Regularities of formation of the chemical composition of mine waters and their influence on the geo-ecological situation («Komissarovskaya» mine, Eastern Donbass). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya = Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2015;(6):505-513. (In Russ.).
5. Gavrishin A.I. Mine waters of the Eastern Donbass and their effect on the chemistry of groundwater and surface water in the region. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2018;45(5):555-565. (In Russ.).
6. Kizilshstein L.Ya. *Ecogeochemistry of trace elements in coals*. Rostov-on-Don: North Caucasus Higher School Research Center Press; 2002. 296 p. (In Russ.).
7. Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S., Bakaeva E.N. Hydroecological features of the surface waters of the coal-mining territories of the Eastern Donbass. *Izv. RAN. Ser. geogr.* 2020;(3):451-460. (In Russ.).
8. Levchenko S.V. *Geological conditions of formation and complex use of metalliferous coals of the Eastern Donbass*. Dissertation thesis. Rostov-on-Don, 2012. 24 p. (In Russ.).
9. Yudovich Ya. E., Ketris M.P. *Toxic trace elements in fossil coals*. Ekaterinburg: Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Press; 2005. 654 p. (In Russ.).
10. Taranushich F. F. Trace elements in the coals of Eastern Donbass. *Litologiya i poleznye iskopaemye = Lithology and Mineral Resources*. 2003;(1):97-103. (In Russ.).
11. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace Elements in River Waters. *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier Publ.; 2014:195-235.
12. Grigoriev N.A. *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Press; 2009. 381 p. (In Russ.).

13. Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E. Bottom sediments as a source of secondary water pollution by metals (according to the laboratory experiment). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(4):102-109. (In Russ.).

14. Soldatova E.A., Guseva N.V. Study of the processes of redistribution of chemical elements in the water-bottom sediment system of watercourses of the Tom-Yaya interfluvium. *Underground hydrosphere. Materials of the All-Russian meeting on groundwater in eastern Russia*. Irkutsk: Geograf Publ.; 2012:246-249. (In Russ.).

15. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Popov Yu.V. Distribution and mineral forms of iron in river sediments of Eastern Donbass. *Water resources in the context of global challenges: environmental problems, management, monitoring. Collection of Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*. Novocherkassk: Lik Publ.; 2023;1:89-95. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.В. Гибков – кандидат географических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле.

В.Е. Закруткин – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле.

Г.Ю. Склярченко – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле.

В.Н. Решетняк – аспирант, младший научный сотрудник, Институт наук о Земле.

Information about the authors

E.V. Gibkov - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences.

V.E. Zakrutkin - Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences.

G.Yu. Sklyarenko - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Head of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences.

V.N. Reshetnyak - Postgraduate Student, Junior Researcher, Institute of Earth Sciences.

*Статья поступила в редакцию 26.06.2023; одобрена после рецензирования 08.07.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 26.06.2023; approved after reviewing 08.07.2023; accepted for publication 30.10.2023.*

Научная статья

УДК 502.58

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-91-102

ЭНЕРГИЯ И СУТОЧНЫЙ ХОД МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ В ЛОКАЦИЯХ ПОЖАРОВ ОТ ГРОЗ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

**Андрей Владимирович Каранин^{1✉}, Нина Алексеевна Кочеева², Марина Юрьевна Беликова³,
Виктор Александрович Какорин⁴**

^{1, 2, 3, 4} Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Республика Алтай, Россия

¹vedmedk@bk.ru✉

²nina_kocheewa@mail.ru

³belikovamy@yandex.ru

⁴wittorio.kakorin@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследования суточного хода грозовой активности и энергетических параметров молниевых разрядов в локациях грозовых пожаров. В качестве региона исследования выступает территория Республики Алтай, данные о пожарах получены от Министерства природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай и Алтайского государственного природного биосферного заповедника, данные о грозовой активности предоставлены глобальной сетью регистрации молниевых разрядов WWLLN. Временной интервал исследования – с мая по октябрь 2016–2020 гг.

Обнаружено смещение максимумов грозовой активности в дни, предшествующие пожарам, со второй половины дня (15–16 ч) на вечернее время (18–19 и 21 ч). Выявлены закономерности почасовой динамики энергии разрядов для территории республики – плавное нарастание медианных значений с первой половины дня к вечеру и снижение в ночное и утреннее время. Установлено, что в дни, предшествующие пожарам, увеличивается медианная энергия разрядов (на 13 % от обычного показателя), также наблюдается увеличение значений первого квартиля энергии разрядов (на 27 % от обычного).

Ключевые слова: природный пожар, пожары от гроз, грозовая активность, энергия молний, плотность молний, суточный ход, WWLLN, Республика Алтай

Для цитирования: Каранин А.В., Кочеева Н.А., Беликова М.Ю., Какорин В.А. Энергия и суточный ход молниевой активности в локациях пожаров от гроз на территории Республики Алтай // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 91–102.

Благодарности: авторы признательны Министерству природных ресурсов, экологии и туризма Республики Алтай и сотрудникам Алтайского государственного природного биосферного заповедника за предоставленные сведения и сотрудничество.

Кроме того, авторы благодарны коллаборации Всемирной сети регистрации молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>)) за предоставление данных, использованных в работе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Алтай в рамках научного проекта № 20-45-040012.

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

Original article

ENERGY AND DIURNAL RATE OF THUNDERSTORM ACTIVITY IN THE LIGHTNING INITIATED WILDFIRE LOCATIONS ON THE ALTAI REPUBLIC TERRITORY

Andrey V. Karanin^{1✉}, Nina A. Kocheeva², Marina Yu. Belikova³, Victor A. Kakorin⁴

^{1, 2, 3, 4} Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Altai Republic, Russia

¹vedmedk@bk.ru

²nina_kocheewa@mail.ru✉

³belikovamy@yandex.ru

⁴wittorio.kakorin@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the thunderstorm activity diurnal rate and the energy parameters of lightning discharges in locations of thunderstorm fires. The Altai Republic territory serves as the region of research, fire data were obtained from the Ministry of Natural Resources, Ecology and Tourism of the Altai Republic and the Altai State Nature Biosphere, data on thunderstorm activity were provided by the World Wide Lightning Location Network (WWLLN). The study period covers May to October from 2016 to 2020.

It was found that the maximum thunderstorm activity shifts from the second half of the day (15-16 hours) to the evening (18-19 and 21 hours) in the days preceding fires. Regularities in hourly dynamics of discharge energy for the territory of the republic were identified - median values gradually increasing from the first half of the day to the evening and decreasing at night and in the morning. It was also established that in the days preceding fires, there is an increase in median discharge energy (by 13 % from the usual value), as well as an increase in values of the first quartile of discharge energy (by 27 % from the usual value).

Keywords: wildfire, lightning initiated wildfire, thunderstorm activity, lightning energy, lightning density, diurnal rate, WWLLN, Altai Republic

For citation: Karanin A.V., Kocheeva N.A., Belikova M.Yu., Kakorin V.A. Energy and Diurnal Rate of Thunderstorm Activity in the Lightning Initiated Wildfire Locations on the Altai Republic Territory. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):91-102. (In Russ.).

Acknowledgments: the authors are grateful to the Ministry of Natural Resources, Ecology and Tourism of the Republic of Altai and the staff of the Altai State Natural Biosphere Reserve for the provided information and cooperation.

In addition, the authors are grateful to the World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>) collaboration for providing the data used in the work.

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Republic of Altai within the framework of scientific project No. 20-45-040012.

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

Введение

Изучение особенностей генезиса природных пожаров имеет большое значение. Пожары наносят существенный ущерб растительности, животному миру, оказывают разрушительное воздействие на наземные экосистемы, ухудшая биологические, химические и физические свойства почв [1]. Дым, частицы и аэрозоли, поступающие в атмосферу, рассеивают и поглощают солнечное излучение, что приводит к региональным климатическим изменениям, снижению температуры поверхности почв, уменьшению осадков и недостатку влаги [2, 3]. Суммарный объем выбросов пыли и аэрозолей от природных пожаров сопоставим с выбросами от извержения вулканов и может превышать 100 млн т [4]. Небольшой размер частиц дыма позволяет им подниматься на высоту до 10–12 км и разноситься на огромные площади [5]. Токсичная мелкодисперсная взвесь оказывает негативное влияние на здоровье населения. В ряде работ [6–8] отмечаются сильные положительные связи между воздействием дыма и обострениями астмы, бронхита и пневмонии, а также некоторых других заболеваний.

Основная причина пожаров – человеческий фактор [9]. Однако на территориях с малой плотностью населения ведущими являются причины природного происхождения, главную роль среди которых играют грозы. В наименее населенных районах России доля возгораний от гроз достигает 70–90 % от их общего количества [10, 11].

Если учесть, что такие территории обладают разреженной транспортной сетью и слаборазвитой инфраструктурой, вопросы своевременного обнаружения отдалённых возгораний приобретают особую актуальность. Разгоревшийся крупный пожар зачастую нельзя потушить по причине невозможности доставки нужного количества людей и техники к месту стихийного бедствия. Одним из средств мониторинга локаций возможных возгораний могут служить грозопеленгационные системы, способные определять координаты молниевых разрядов в оперативном режиме.

В настоящий момент в Республике Алтай на базе Горно-Алтайского государственного университета действует грозопеленгационная станция, которая входит в глобальную систему слежения за молниевой активностью – World Wide Lightning Location Network (WWLLN) [12] – иные системы инструментального контроля молниевой активности в регионе отсутствуют. Сеть WWLLN обладает широким пространственным охватом, станции способны детектировать вспышки, возникающие за тысячи километров от них, что позволяет вести наблюдение за всей территорией республики.

Условия воспламенения природного горючего материала могут зависеть от суточной динамики молниевых разрядов, которая довольно сильно варьируется из-за региональных природно-климатических особенностей [13, 14]. Некоторые исследователи указывают [15], что время суток не оказывает существенного влияния на вероятность возникновения пожара от удара молнии (в пределах изучаемого ими региона) в отличие от времени года. В то же время другие ученые обращают внимание, что молниевые разряды, происходящие ближе к вечеру, способны вызывать отложенные пожары, которые в ночной период находятся в фазе тления [16], а дневные молнии приводят к увеличению площади возгорания [17]. В работе [18] отмечается, что ночное время препятствует распространению пламени из-за более низкой температуры и меньшего дефицита водяного пара, также указывается на ослабление ночного барьера в последние десятилетия из-за климатических преобразований. Исходя из этого, можно предположить, что риск воспламенения от молнии ночью и днём также будет разным.

Вероятность воспламенения природного горючего материала зависит не только от его свойств, влажности и самого факта попадания молнии, но и от энергии разряда, которой должно быть достаточно, чтобы испарить влагу и нагреть горючее до критической температуры. При большой силе тока и высоком сопротивлении почвы вдоль корней дерева возможно образование электрических искр [19], способных инициировать возгорание. Современные системы регистрации молниевой активности могут вычислять энергию вспышки, оцениваемую по радиосигналу в определенном диапазоне частот, и силу тока [20–22].

В этом ключе представляется интересным оценить суточный ход молниевой активности и энергию разрядов в пределах локаций пожаров. Для территории Республики Алтай исследование выполняется впервые.

Материалы и методы

Целью исследования является изучение энергетических параметров и суточного хода молниевой активности в локациях грозных пожаров на территории Республики Алтай в период с мая по октябрь 2016–2020 гг.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Сбор и обработка данных о количестве, плотности и энергии молниевых разрядов: а – на территории Республики Алтай; б – в локациях пожаров; в – в локациях пожаров за десять дней до их видимого проявления.
2. Анализ энергии и суточного хода молниевой активности по территории региона и в локациях пожаров.

Сведения о грозных пожарах были предоставлены Министерством природных ресурсов и экологии Республики Алтай, а также Алтайским государственным природным биосферным заповедником.

Данные о грозовой активности предоставлены глобальной сетью регистрации молниевой активности WWLLN (World Wide Lightning Location Network). Сеть состоит из более чем 80 станций, расположенных по всему миру, одна из которых находится на территории Горно-Алтайского государственного университета. Принцип детектирования молниевых разрядов основан на регистрации излучения в очень низкочастотном диапазоне (3–30 кГц), местоположение вспышки и её время определяются по интервалу запаздывания прохождения сигнала от источника до ближайших датчиков [23]. С 2010 г. производится расчет энергии молнии для сферической волны в диапазоне 6–18 кГц за 1,3 мс, принцип которого описывается в работе [24]. WWLLN более чувствительна к разрядам облако – земля, нежели к другим, средняя пространственная точность определения координат молнии составляет около 5 км [25].

Момент регистрации молниевых разрядов происходит по всемирному координированному времени, которое и вносится в базу данных WWLLN. Для расчета суточного ритма молниевой активности возникла необходимость пересчитать эту информацию в местное время. Технически правильным решением задачи стало бы вычисление местного солнечного времени на основе координат долготы зафиксированной вспышки, тогда оно было бы наиболее точным. Однако в этом случае утратилась бы возможность сопоставления с данными пожаров, так как в предоставленных нам материалах указано поясное время регистрации возгорания. Исходя из этого, мы посчитали целесообразным перевести данные по молниевым разрядам не в местное солнечное, а в поясное время. При сравнении результатов с другими работами необходимо учитывать этот момент. В нашем случае разница между поясным и солнечным временем для территории Республики Алтай составляет 1–1,5 ч (поясное больше солнечного), в зависимости от координат долготы события.

Согласно исследованию [26], основная часть лесных пожаров случается в первые пять суток после прохождения грозы, но в отдельных случаях этот период больше. Поэтому предельный период скрытого горения был принят нами за десять дней.

Таким образом, для учета периода тления и погрешности измерения местоположения молнии выборка грозовых разрядов производилась в радиусе 10 км от центра пожара в интервале 10 сут (14 400 мин), предшествовавших его регистрации. Следует отметить, что разряды фиксировались не для каждой подобной локации, в ряде случаев их отмечено не было. Это связано, во-первых, с особенностями регистрации молниевых разрядов системой WWLLN, которая детектирует не все вспышки, а около 11–15 % от их общего числа [27]. Во-вторых, в ходе проведения исследования использовались только данные молний с известным (ненулевым) значением энергии. Всего для анализа молниевой активности в локациях пожаров из 97 возгораний (с известным временем регистрации и точными координатами) полностью всем условиям удовлетворяли только 73 события, по ним и производилась обработка.

Для оценки фоновых условий грозовой активности в локациях пожаров, а также типичности этих условий по отношению к среднереспубликанским была осуществлена выборка разрядов в радиусе 10 км от центра пожара в интервале с мая по октябрь за 2016–2020 гг.

Пространственная и временная выборка данных, расчеты базовых статистических характеристик осуществлялись в геоинформационной системе QGIS [28].

Дискуссия и обсуждение

Республика Алтай расположена на юге Западной Сибири, является горным регионом и характеризуется многообразием природных условий. Повышенная молниевая активность более свойственна северным районам изучаемой территории, отличающимся повышенным количеством осадков, однако пожары от гроз случаются чаще в Центральном Алтае (почти половина от их общего числа), который имеет более аридный климат.

В работе [29] отмечается, что по укрупненным регионам Западной Сибири с 2016 по 2021 г. доля пожаров от гроз варьируется от 5 до 43 % в теплое время года. При этом количество пожаров выше на юго-западе и юге Западной Сибири, а наибольшая вероятность возгорания от молнии наблюдается в северной ее части. Дополним эту картину ситуацией, сложившейся в Республике Алтай. С 2016 по 2020 г. здесь произошло 134 грозовых пожара, что составило 61 % от

суммарного количества пожаров. Высокая доля возгораний от молний объясняется местной спецификой: регион слабо освоен и имеет низкую плотность населения, ряд районов удален и труднодоступен, леса и лесостепи достаточно распространены, площадь лесопокрытой территории составляет 44 % [30].

Для проведения нашего исследования полностью подходили данные только по 73 пожарам, дальнейшая работа выполнялась на их основе.

Суточный ход числа молниевых разрядов для всего региона исследования представлен на рис. 1а. Характер почасового распределения грозовой активности в целом совпадает с результатами ранее выполненного исследования по Алтае-Саянскому региону за 2011–2016 гг. [31].

Минимум грозовой активности приходится на период с 7 до 9 ч, а максимум – с 14 до 17 ч поясного времени, суточная амплитуда составляет 808 % по соотношению наибольшего показателя к наименьшему (0,01496 разряда на 1 км² в 16 ч; 0,00185 разряда на 1 км² – в 8 ч).

Для оценки того, насколько типична грозовая активность на участках, где произошли пожары, выявления возможных отклонений от республиканских показателей была осуществлена выборка молниевых разрядов в радиусе 10 км от центра возгорания. На этом этапе отбирались все разряды, зарегистрированные с мая по октябрь в 2016–2020 гг. Выяснилось, что суточный ход грозовой активности здесь почти не отличается от среднереспубликанского (рис. 1б). Несколько более высок ночной пик (0 ч), наблюдается незначительное увеличение числа разрядов в утренние часы (4–5 ч), а также вечером (18 ч), но эти различия слабо выражены. Следовательно, можно говорить о том, что грозовая активность для исследуемых участков возгораний носит типичный характер.

Следующим шагом был выполнен анализ суточного хода молниевых разрядов непосредственно перед пожаром. Для этого были отобраны разряды, случившиеся за десять дней до регистрации возгорания (14 400 мин) в радиусе 10 км от его центра. Заданным условиям отвечали 503 разряда, их почасовое распределение показано на рис. 1в.

Ночной и утренний периоды характеризуются малым количеством молний или полным их отсутствием. Основное число разрядов наблюдается в послеобеденное и вечернее время (с 14 до 22 ч), наибольшие значения отмечаются для 18 (0,0033 разряда на 1 км²) и 21 ч (0,0028 разряда на 1 км²). На графике заметен некоторый сдвиг вправо по сравнению с ситуацией по Республике Алтай в целом. Полученные результаты позволяют говорить о том, что пожары инициируются преимущественно грозами, происходящими во второй половине дня и вечером. Мы полагаем, что ближе к вечернему времени утренняя влага испаряется, воздух и лесная подстилка становятся более сухими, складываются наиболее благоприятные условия для возгорания растительности.

Суточное распределение энергии молний по территории Республики Алтай (рис. 2а) имеет отличия от распределения количества разрядов в течение дня и ночи (рис. 1а).

Медианная энергия разрядов плавно нарастает с 8 (926 Дж) до 18–19 ч, когда достигает до максимальных значений (2267 Дж), затем снижается к ночи, с 0 до 7 ч колеблется в пределах 982–1275 Дж, за исключением короткого ночного пика в 2 ч (1477 Дж). Амплитуда значений медианной энергии в течение суток менее выражена, чем суточная амплитуда количества молний на 1 км², и составляет 245 % по соотношению наибольшего показателя к наименьшему (в 18 ч – 2267 Дж, в 8 ч – 926 Дж).

Существенное количество выбросов значений на диаграмме (черные точки) обусловлено большим размером выборки (от 861 до 6953 разрядов для каждого часа; суммарно – свыше 82 тыс. разрядов).

Суточный ход медианной энергии молний в локациях пожаров в период с мая по октябрь в 2016–2020 г. (рис. 2б) более вариативен в сравнении с республиканскими показателями, но общие тенденции сохраняются – высокие значения – во второй половине дня и вечером (1684–2093 Дж с 16 до 22 ч), низкие – в ночное время и утренние часы (708–1466 Дж с 0 до 11 ч). Максимумы наблюдаются в 18 (2006 Дж) и 22 ч (2093 Дж), минимумы – в 5 (763 Дж) и 11 ч (706 Дж). Амплитуда значений медианной энергии разрядов составляет 296 %. Исходя из этого, суточное распределение энергии молний в локациях пожаров можно признать близким к типичному.

Иначе дело обстоит с почасовой динамикой энергетических параметров разрядов в интервале 10 дней перед пожаром (рис. 2в).

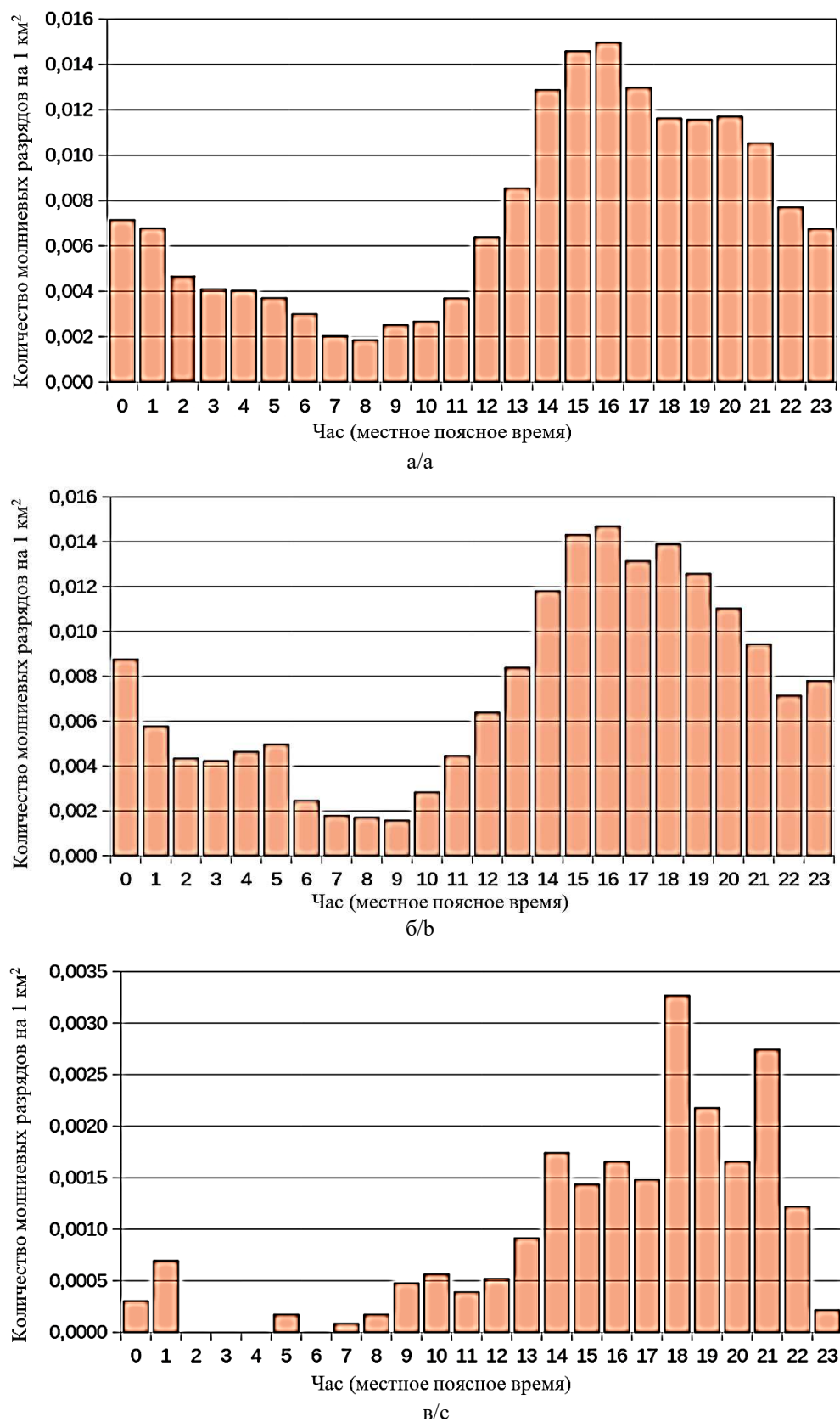


Рис. 1. Суточный ход молниевой активности: а – среднее за период с мая по октябрь по Республике Алтай; б – среднее за период с мая по октябрь в локациях пожаров; в – среднее в локациях пожаров за период десяти дней до их проявления / Fig. 1. Diurnal flash rate: a - average for the period from May to October across the Altai Republic; b - average for the period from May to October in fire locations; c - average for the ten-day period preceding fires in their locations

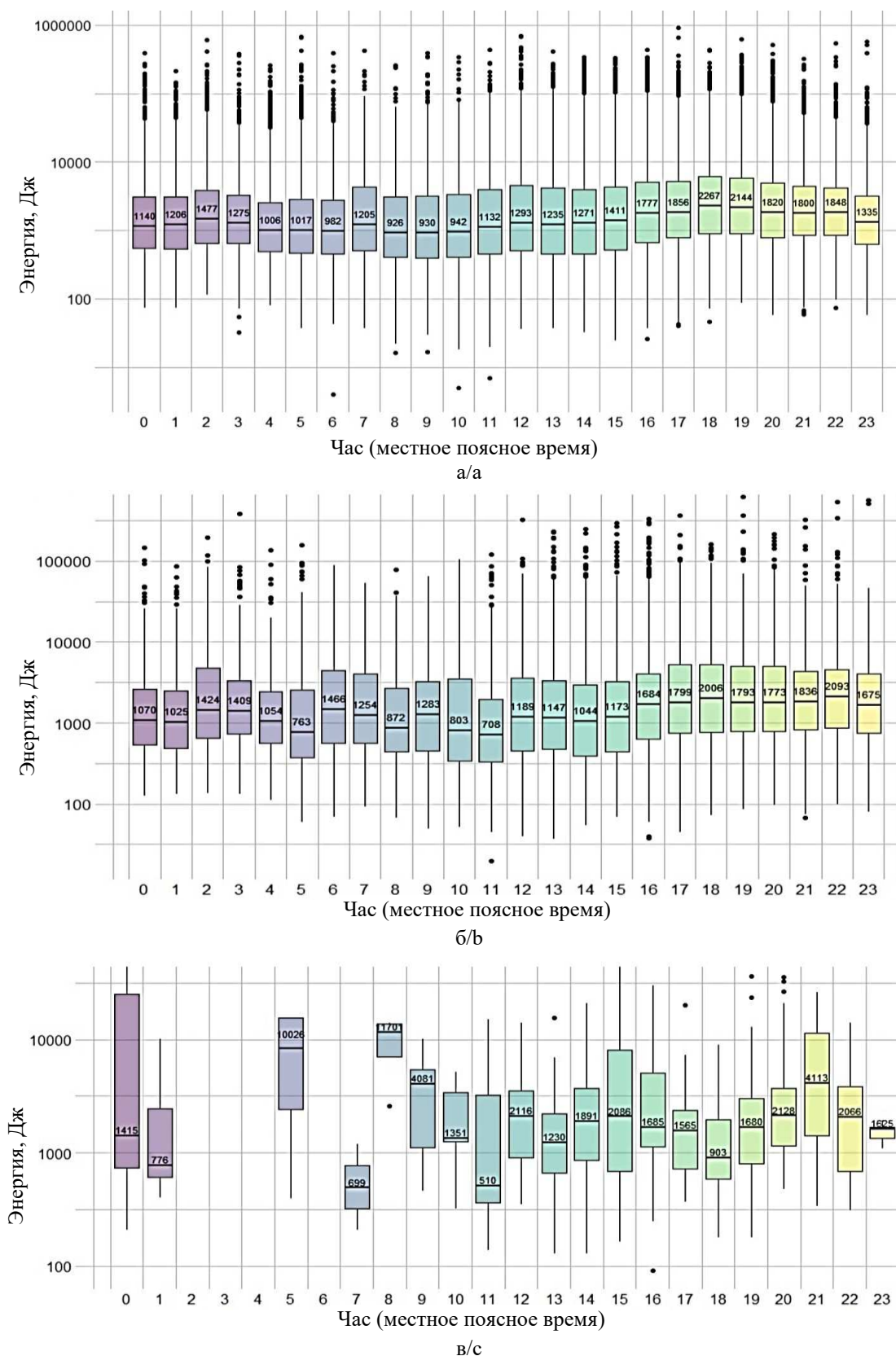


Рис. 2. Суточный ход энергии молниевых разрядов (внутри диаграмм подписаны медианные значения энергий): а – по Республике Алтай в период с мая по октябрь; б – в локациях пожаров в период с мая по октябрь; в – в локациях пожаров за период десяти дней до их проявления / Fig. 2. Diurnal energy variation of lightning discharges (median energy values are labeled inside the diagrams): a - across the Altai Republic during the period from May to October; b - in fire locations during the period from May to October; c - in fire locations during the 10-day interval prior to their occurrence

Если в период с мая по октябрь исследуемый показатель меняется достаточно плавно в течение дня, то перед пожаром отмечаются достаточно резкие перепады от часа к часу. Какой-либо закономерности распределения суточного хода энергии молний не прослеживается. Наибольшая медианная энергия молний в локациях пожаров фиксируется в утренние часы (в 5 ч – 10026 Дж; в 8 ч – 11701 Дж), при этом в 7 ч регистрируется одно из самых низких значений (699 Дж). Максимальное количество молний с большой энергией проявляется в 21 ч (63 разряда; медианная энергия – 4113 Дж), с малой энергией – в 18 ч (75 разрядов; медианная энергия – 903 Дж). Такие значительные вариации, вероятно, объясняются меньшим размером выборки (суммарно 503 разряда), особенно малочисленной для утренних часов (с 5 до 8 ч зарегистрировано всего 10 разрядов). Учитывая, что регистрируемая энергия молний может различаться на несколько порядков (максимальная в нашем случае составила 211 кДж, минимальная – 92 Дж), при малом количестве разрядов может наблюдаться существенный разброс значений. Исходя из этого, было принято решение произвести сравнение статистических показателей разных выборок энергии молниевой активности безотносительно суточной динамики (таблица).

Энергия молниевых разрядов, Дж / Energy of lightning discharges, J

Показатель	Минимум	Максимум	Медиана	Квартиль-1	Квартиль-3
Вся республика с мая по октябрь	4	923511	1515	617	4336
Локации пожаров с мая по октябрь	20	923511	1434	583	3882
Локации пожаров в интервале 10 дней до проявления возгорания	92	211393	1620	743	4183

Медианная энергия молний по изучаемой территории составила 1515 Дж, что выше глобальных показателей, которые колеблются около 1000 Дж [32]. Это характерная ситуация для Западной Сибири, доля разрядов свыше 10 кДж в среднегорьях и высокогорьях больше, чем на равнинах и низкогорьях [33].

За весь период наблюдения (2016–2020 гг.) в регионе не зафиксировано ни одной сверхмолнии, к которым принято относить разряды с энергией свыше 1 млн Дж, максимальный зарегистрированный показатель составил 0,923 млн Дж.

Величина медианной энергии молний в локациях возгораний в период с мая по октябрь чуть ниже республиканской, также ниже располагаются границы первого и третьего квартиля. В интервале 10 дней до пожара медианная энергия разрядов растёт до 1620 Дж (на 13 % выше обычного показателя для исследуемых участков), также поднимаются значения границы первого (743 Дж, на 27 % выше обычного показателя) и третьего квартиля (4183 Дж, на 8 % выше обычного показателя). Следовательно, можно говорить о том, что более энергоёмкие грозовые разряды увеличивают риск воспламенения природного горючего материала. Тем не менее должны заметить, что энергия молнии, рассматриваемая сама по себе, в отрыве от других факторов, влияющих на инициацию возгорания, не может служить надёжным предиктором пожара. Удары даже слабых молний при наличии соответствующих условий способны привести к воспламенению. Например, пожар, произошедший в долине р. Урсул, неподалёку от села Бичикту-Бом (Онгудайский район), был инициирован одиночным разрядом – 130 Дж. Вместе с тем учёт энергии разряда в комплексе с другими параметрами, по нашему мнению, способен повысить точность определения пожароопасных участков при прохождении грозы.

Заключение

Суточный ход грозовой активности в локациях пожаров и в целом на территории Республики Алтай имеет мало отличий. Можно считать исследуемые участки возгораний типичными в плане почасовой динамики количества молниевых разрядов. В интервале 10 дней до возникновения пожара динамика меняется, наблюдается смещение максимумов грозовой активности с 15–16 к 18–19 и 21 ч. Исходя из этого, можно предположить, что существенная часть возгораний инициируется молниями в вечернее время.

Суточный ход энергии разрядов по территории Республики Алтай и в локациях пожаров имеет ряд общих черт – плавное нарастание медианных значений с первой половины дня к вечеру и снижение в ночное время. В отличие от почасового распределения числа молниевых разрядов, максимумы активности приходятся на 18 и 22 ч (по участкам возгораний) и 18–19 ч (по Республике Алтай). Минимумы свойственны утреннему времени и первой половине дня. Несмотря на некоторые отличия, суточный ход медианной энергии разрядов в локациях пожаров можно признать близким к среднерегionalным показателям.

Суточный ход энергии разрядов за десятидневный период, предшествовавший пожарам, не имеет выраженных закономерностей, наблюдаются сильные перепады медианных значений от одного часа к другому. При этом в соседние часы могут отмечаться наибольшие и наименьшие показатели. Дальнейшее изучение этого вопроса требует увеличения объема данных.

В интервале 10 дней до пожара медианная энергия разрядов увеличивается на 13 % выше фонового показателя для исследуемых участков, причем значения границы первого квартиля энергии поднимаются еще больше – на 27 % выше фоновых значений и на 20 % выше средних по региону. Подобные тенденции могут говорить о необходимости учета энергии разрядов в совокупности с другими факторами для выявления участков возгораний от гроз.

Список источников

1. *Agbeshie A.A., Abugre S., Atta-Darkwa T., Awuah R.* A review of the effects of forest fire on soil properties // *J. of Forestry Research*. 2022. Vol. 33, № 5. P. 1419–1441. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-022-01475-4> (дата обращения: 12.05.2023).
2. *Liu Y., Goodrick S., Heilman W.* Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire-climate interactions // *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol. 317. P. 80–96. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037811271300114X> (дата обращения: 12.05.2023).
3. *Гришин А.М.* О влиянии негативных экологических последствий лесных пожаров // *Экологические системы и приборы*. 2003. № 4. С. 40–43.
4. *Малахов С.Г., Махонько Е.П.* Выброс токсичных металлов в атмосферу и их накопление в поверхностном слое земли // *Успехи химии*. 1990. Т. 59, вып. 11. С. 1777–1798. <https://doi.org/10.1070/RC1990v059n11ABEH003575>.
5. *Щербов Б.Л., Лазарева Е.В., Журкова И.С.* Лесные пожары и их последствия (на примере сибирских объектов). Новосибирск: Гео, 2015. 154 с.
6. *Youssouf H., Lioussé C., Roblou L., Assamoï E.-M., Salonon R.O., Maesano C., Banerjee S., Annesi-Maesano I.* Non-accidental health impacts of wildfire smoke // *Int. J. of Environmental Research and Public Health*. 2014. Vol. 11, № 11. P. 11772–11804. <https://doi.org/10.3390/ijerph11111772>.
7. *Liu J.C., Pereira G., Uhl S.A., Bravo M.A., Bell M.L.* A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke // *Environmental Research*. 2015. Vol. 136. P. 120–132. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25460628/> (дата обращения: 12.05.2023).
8. *Reid C.E., Brauer M., Johnston F.H., Jerrett M., Balmes J.R., Elliott C.T.* Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure // *Environmental Health Perspectives*. 2016. Vol. 124, № 9. P. 1334–1343. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409277>.
9. *Каницкая Л.В.* Лесная пирология: учеб. пособие. Иркутск: Байкальский гос. ун-т, 2013. 212 с.
10. *Козлов В.И., Муллаяров В.А., Соловьев В.С.* Лесные пожары в Якутии от гроз // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Т. 2, № 6. С. 388.
11. *Пономарев Е.И., Иванов В.А., Корищун Н.А.* Спутниковые данные TOVS при решении задачи прогнозирования грозовой пожарной опасности в лесу // *География и природные ресурсы*. 2006. № 1. С. 147–150.
12. Всемирная сеть локализации молниевых разрядов (WWLLN). URL: <http://wwlln.net> (дата обращения: 12.05.2023).
13. *Virts K.S., Wallace J.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H.* Highlights of a New Ground-Based, Hourly Global Lightning Climatology // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013. Vol. 94(9). P. 1381–1391. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/94/9/bams-d-12-00082.1.xml> (дата обращения: 12.05.2023).
14. *Blakeslee R.J., Mach D.M., Bateman M.G., Bailey J.C.* Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit // *Atmospheric Research*. 2014. Vol. 135–136. P. 228–243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.023>.
15. *Dowdy A.J., Mills G.* Characteristics of lightning-attributed wildland fires in south-east Australia // *Int. J. of Wildland Fire*. 2012. Vol. 21. P. 521–524. <https://doi.org/10.1071/WF10145>.

16. Pineda N., Altube P., Alcasena F.J., Casellas E., San Segundo H., Montanyà J. Characterizing the holdover phase of lightning-ignited wildfires in Catalonia // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2022. Vol. 324. P. 109111. URL: <https://ssrn.com/abstract=4022142> (дата обращения: 12.05.2023).
17. Müller M.M., Vacik H. Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017. Vol. 240. P. 26–34.
18. Balch J.K., Abatzoglou J.T., Joseph M.B., Kootz M.J., Mahood A.L., McGlinchy J., Cattau M., Williams A.P. Warming weakens the night-time barrier to global fire // *Nature*. 2022. Vol. 602. P. 442–448. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04325-1>.
19. Иванов В.А. Лесные пожары от гроз на Енисейской равнине : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1996. 23 с.
20. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B., Rodger C.J. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network // *Radio Sci.* 2012. Vol. 47. RS6005. Doi:10.1029/2012RS005049.
21. Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Аджиева А.А., Куповых Г.В., Тумгоева Х.А. Определение параметров молниевых разрядов с использованием грозорегистратора LS8000 // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2018. № 3 (199). С. 55–62. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-molnievyh-razryadov-s-ispolzovaniem-grozoregistratora-ls8000> (дата обращения: 12.05.2023).
22. Еришова Т.В., Горбатенко В.П. Параметры молниевой активности по инструментальным измерениям // *Вестн. ТГПУ*. 2011. № 5. С. 150–154. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-molnievoy-aktivnosti-po-instrumentalnym-izmereniyam> (дата обращения: 12.05.2023).
23. Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2002. Vol. 64, № 7. P. 817–830. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00085-8).
24. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Rodger C.J., Brundell J.B. Far-Field Power of Lightning Strokes as Measured by the World Wide Lightning Location Network // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2012. Vol. 29. P. 1102–1110. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00174.1>.
25. Abarca S.F., Corbosiero K.L., Galarneau Jr. T.J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, D18206. Doi: 10.1029/2009JD013411.
26. Иванов В.А., Коришунов Н.А., Матвеев П.М. Пожары от молний в лесах Красноярского Приангарья. Красноярск: СибГТУ, 2004. 132 с.
27. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Virts K.S., Wallace J.M., Heckman S. Radiated VLF energy differences of land and oceanic lightning // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, № 10. P. 2390–2394. <https://doi.org/10.1002/grl.50406>.
28. QGIS Geographic Information System. QGIS Association, 2022. URL: <http://www.qgis.org> (дата обращения: 12.05.2023).
29. Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O. Analysis of Spatio-Temporal Variability of Lightning Activity and Wildfires in Western Siberia during 2016–2021 // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. P. 669. <https://doi.org/10.3390/atmos13050669>.
30. Лесной план Республики Алтай: руководящий документ. Горно-Алтайск, 2008 г. 572 с.
31. Каранина С.Ю., Кочеева Н.А., Каранин А.В. Пространственное и временное распределение молниевых разрядов по территории Алтае-Саянского региона // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2017. № 4-1 (196). С. 128–138. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennoe-i-vremennoe-raspredelenie-molnievyh-razryadov-po-territorii-altae-sayanskogo-regiona> (дата обращения: 12.05.2023).
32. Holzworth R.H., McCarthy M. P., Brundell J. B., Jacobson A. R., Rodger C. J. Global distribution of superbolts // *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. Vol. 124. P. 9996–10005. <https://doi.org/10.1029/2019JD030975>.
33. Karanina S.Yu., Karanin A.V., Kocheeva N.A., Belikova M.Yu. Assessment of the lightning discharge energy depending on the height of the territory above sea level for Western Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 840, № 1. P. 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/840/1/012034>.

References

1. Agbeshie A.A., Abugre S., Atta-Darkwa T., Awuah R. A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*. 2022;33(5):1419-1441. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-022-01475-4> [Accessed 12th May 2023].
2. Liu Y., Goodrick S., Heilman W. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire-climate interactions. *Forest Ecology and Management*. 2014;317:80-96. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037811271300114X> [Accessed 12th May 2023].
3. Grishin A.M. On the impact of negative environmental consequences of forest fires. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*. 2003;(4):40-43. (In Russ.).

4. Malakhov S.G., Makhonko E.P. Emission of toxic metals into the atmosphere and their accumulation in the surface layer of the Earth. *Russian Chem. Reviews*. 1990;59(11):1037-1050, <https://doi.org/10.1070/RC1990v059n11ABEH003575>.
5. Shcherbov B.L., Lazareva E.V., Zhurkova I.S. *Forest fires and their consequences (using examples from Siberian locations)*. Novosibirsk: Geo Publ.; 2015. 154 p. (In Russ.).
6. Youssouf H., Liousse C., Roblou L., Assamoi E.-M., Salonen R.O., Maesano C., Banerjee S., Annesi-Maesano I. Non-accidental health impacts of wildfire smoke. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2014;11(11):11772-11804, <https://doi.org/10.3390/ijerph111111772>.
7. Liu J.C., Pereira G., Uhl S.A., Bravo M.A., Bell M.L. A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke. *Environmental Research*. 2015;136:120-132. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25460628/> [Accessed 12th May 2023].
8. Reid C.E., Brauer M., Johnston F.H., Jerrett M., Balmes J.R., Elliott C.T. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives*. 2016;124(9):1334-1343, <https://doi.org/10.1289/ehp.1409277>.
9. Kanitskaya L.V. *Forest pyrology: Study guide*. Irkutsk: Baikal State University Press; 2013. 212 p. (In Russ.).
10. Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Solov'ev V.S. Forest Fires in Yakutia from Thunderstorms. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2009;2(6):388. (In Russ.).
11. Ponomarev E.I., Ivanov V.A., Korshunov N.A. TOVS satellite data in solving the problem of predicting thunderstorm fire hazard in the forest. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2006;(1):147-150. (In Russ.).
12. *World Wide Lightning Location Network (WWLLN)*. Available from: <http://wwlln.net> [Accessed 12th May 2023].
13. Virts K.S., Wallace J.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H. Highlights of a New Ground-Based, Hourly Global Lightning Climatology. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013;94(9):1381-1391. Available from: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/94/9/bams-d-12-00082.1.xml> [Accessed 12th May 2023].
14. Blakeslee R.J., Mach D.M., Bateman M.G., Bailey J.C. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit. *Atmospheric Research*. 2014;135-136:228-243, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.023>.
15. Dowdy A.J., Mills G. Characteristics of lightning-attributed wildland fires in south-east Australia. *International Journal of Wildland Fire*. 2012;21:521-524, <https://doi.org/10.1071/WF10145>.
16. Pineda N., Altube P., Alcasena F.J., Casellas E., San Segundo H., Montanyà J. Characterizing the holdover phase of lightning-ignited wildfires in Catalonia. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2022;324:109111. Available from: <https://ssrn.com/abstract=4022142> [Accessed 12th May 2023].
17. Müller M. M., Vacik H. Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017;240:26-34.
18. Balch J.K., Abatzoglou J.T., Joseph M.B., Kootz M.J., Mahood A.L., McGlinchy J., Cattau M., Williams A.P. Warming weakens the night-time barrier to global fire. *Nature*. 2022;602:442-448, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04325-1>.
19. Ivanov V.A. *Forest fires from thunderstorms on the Yenisei Plain*. Dissertation Thesis. Krasnoyarsk, 1996. 23 p. (In Russ.).
20. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B., Rodger C.J. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network. *Radio Sci*. 2012;47:RS6005, doi:10.1029/2012RS005049.
21. Adzhiev A.Kh., Kuliev D.D., Adzhieva A.A., Kupovykh G.V., Tumgoeva Kh.A. Identification of lightning discharge parameters using the LS8000 lightning detector. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2018;(3):55-62. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-molnievyh-razryadov-s-ispolzovaniem-grozoregistratora-ls8000> [Accessed 12th May 2023]. (In Russ.).
22. Ershova T.V., Gorbatenko V.P. Lightning activity parameters according to instrumental measurements. *Vestn. TGPU = Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2011;(5):150-154. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-molnievoy-aktivnosti-po-instrumentalnym-izmereniyam> [Accessed 12th May 2023]. (In Russ.).
23. Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2002;64(7):817-830, [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00085-8).
24. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Rodger C.J., Brundell J.B. Far-Field Power of Lightning Strokes as Measured by the World Wide Lightning Location Network. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2012;29:1102-1110, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00174.1>.

25. Abarca S.F., Corbosiero K.L., Galarnau Jr. T.J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. *J. Geophys. Res.* 2010;115:D18206, doi:10.1029/2009JD013411.

26. Ivanov V.A., Korshunov N.A., Matveev P.M. *Fires from lightning in the forests of the Krasnoyarsk Angara*. Krasnoyarsk: Siberian State Technological University Press; 2004. 132 p. (In Russ.).

27. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Virts K.S., Wallace J.M., Heckman S. Radiated VLF energy differences of land and oceanic lightning. *Geophysical Research Letters*. 2013;40(10):2390-2394, <https://doi.org/10.1002/grl.50406>.

28. *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association, 2022. Available from: <http://www.qgis.org> [Accessed 12th May 2023].

29. Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O. Analysis of Spatio-Temporal Variability of Lightning Activity and Wildfires in Western Siberia during 2016-2021. *Atmosphere*. 2022;13:669, <https://doi.org/10.3390/atmos13050669>.

30. *Forest Plan of the Republic of Altai*: guidance document. Gorno-Altai, 2008. 572 p. (In Russ.).

31. Karanina S.Yu., Kocheeva N.A., Karanin A.V. Spatial and temporal distribution of lightning discharges over the territory of the Altai-Sayan region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(4-1):128-138. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennoe-i-vremennoe-raspredelenie-molnievyh-razryadov-po-territorii-altai-sayanskogo-regiona> [Accessed 12th May 2023]. (In Russ.).

32. Holzworth R.H., McCarthy M.P., Brundell J.B., Jacobson A.R., Rodger C.J. Global distribution of superbolts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019;124:9996-10005, <https://doi.org/10.1029/2019JD030975>.

33. Karanina S.Yu., Karanin A.V., Kocheeva N.A., Belikova M.Yu. Assessment of the lightning discharge energy depending on the height of the territory above sea level for Western Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;840(1):012034, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/840/1/012034>.

Информация об авторах

А.В. Каранин – кандидат географических наук, доцент, кафедра географии и природопользования.

Н.А. Кочеева – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра географии и природопользования.

М.Ю. Беликова – старший преподаватель, кафедра математики, физики и информатики.

В.А. Какорин – магистрант, кафедра географии и природопользования.

Information about the authors

A.V. Karanin - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Geography and Environmental Management.

N.A. Kocheeva - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Geography and Environmental Management.

M.Yu. Belikova - Senior Lecturer, Department of Mathematics, Physics and Informatics.

V.A. Kakorin - Master's Student, Department of Geography and Environmental Management.

*Статья поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 02.07.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 06.06.2023; approved after reviewing 02.07.2023; accepted for publication 30.10.2023.*

Научная статья

УДК 551.515

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-103-109

ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Кайсын Борисович Лиев¹, Станислав Александрович Кущев²

^{1,2}Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

¹buffy-li@mail.ru

²stasuk6@mail.ru

Аннотация. Дана классификация кучево-дождевой облачности: одноячейковые, многоячейковые и суперячейковые, определяемые по радиоэхо облака. Описывается структура каждого типа облака и факторы, влияющие на их формирование и развитие. Подчеркивается, что мощность конвективного движения и ячейковое строение облаков зависят от таких факторов, как термодинамическое состояние атмосферы, структура ветра на различных высотах, рельеф и другие условия, характерные для данного региона. Анализируется повторяемость различных типов процессов в условиях Северного Кавказа, изменчивость от года к году в зависимости от состояния атмосферы. Проведена статистическая обработка радиолокационных параметров базы данных градовых облаков за период 2003–2022 гг. на территории Кабардино-Балкарской Республики. Получено распределение повторяемости времени жизни градовых ячеек, радиолокационной отражаемости и высоты верхней границы. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем в оперативной работе по засеву градовых облаков, при разработке методов сверхсрочного прогноза градовой активности, а также при сопоставительном анализе результатов численного моделирования градовых облаков с данными экспериментальных исследований.

Ключевые слова: град, кучево-дождевые облака, одноячейковые облака, многоячейковые облака, суперячейковые облака, радиолокационная отражаемость, время жизни облака, верхняя граница облака

Для цитирования: Лиев К.Б., Кущев С.А. Градовые процессы различных типов в центральной части Северного Кавказа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 103–109.

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

Original article

HAIL PROCESSES OF VARIOUS TYPES IN THE CENTRAL PART OF THE NORTH CAUCASUS

Kaisyn B. Liev¹, Stanislav A. Kushchev²

^{1, 2} High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

¹buffy-li@mail.ru

²stasuk6@mail.ru

Abstract. This article describes the classification of cumulonimbus clouds, including single-cell, multi-cell, and supercell types, determined by radar echo. The structure of each type of cloud and the factors that influence their formation and development are also discussed. It is emphasized that the strength of convective motion and the cell structure of clouds depend on factors such as the thermodynamic state of the atmosphere, wind structure at different altitudes, terrain, and other conditions specific to the region. The article also discusses the repeatability of different types of processes in the conditions of the North Caucasus, and their variability from year to year depending on the state of the atmosphere. Statistical processing of radar parameters of hail clouds in

© Лиев К.Б., Кущев С.А., 2023

the Kabardino-Balkarian Republic was also conducted for the period from 2003-2022. The distribution of the repeatability of the lifetime of hail cells, radar reflectivity, and upper boundary height was obtained. The results can be used in operational work on hail cloud seeding, the development of methods for long-term forecasting of hail activity, and in comparative analysis of the results of numerical modeling of hail clouds with data from experimental research.

Keywords: hail, cumulonimbus clouds, single-cell clouds, multicell clouds, supercell clouds, radar reflectivity, cloud lifetime, cloud top height

For citation: Liev K.B., Kushchev S.A. Hail Processes of Various Types in the Central Part of the North Caucasus. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):103-109. (In Russ.).

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 широко используется классификация кучево-дождевых облаков по их радиолокационной структуре и динамике развития [1–3].

Согласно принятой ВМО классификации, выделяют три типа кучево-дождевой облачности: одноячейковые, многоячейковые и суперъячейковые. При такой классификации ячейкой считается определенная часть радиоэха облака, которая характеризуется локальным максимумом радиолокационной отражаемости. Радиоэхо одноячейкового конвективного облака имеет один локальный максимум радиолокационной отражаемости. В многоячейковых облаках одновременно может присутствовать несколько ячеек (от двух до пяти-шести) на расстоянии 2–8 км друг от друга. Они визуально объединены в одно радиоэхо, но при его детализации в нем четко различается ячейковая структура. Суперъячейковое облако состоит из одной ячейки с большим значением поперечных и вертикальных размеров и присутствием одновременно как восходящих, так и нисходящих воздушных течений.

Материалы и методы исследований

Целью данной работы является исследование градовых процессов в центральной части Северного Кавказа, выявление их повторяемости и времени жизни, а также некоторых радиолокационных характеристик. Различную радиолокационную структуру и динамику развития кучево-дождевых облаков обуславливает синоптическая ситуация, термодинамическое состояние атмосферы, направление и структура ветра на различных высотах и другие условия, при которых зарождаются и развиваются эти облака.

Стратификация температуры и влажности, а также значение энергии конвективной неустойчивости атмосферы влияют на мощность конвективного движения, а ячейковое строение облаков и особенности динамики их развития зависят в основном от структуры ветра, рельефа, характерного микроклимата данного региона и других факторов.

В основу классификации грозоградовых процессов положены особенности и отличительные признаки [4]:

- структура градовой облачности;
- строение (осесимметричные, несимметричные) конвективных ячеек;
- динамика развития облачной системы в целом;
- динамика развития и продолжительности существования конвективных ячеек;
- закономерности зарождения новых и диссипации старых конвективных ячеек в пространстве и времени;
- закономерности распространения процесса облакообразования в пространстве (дискретно, дискретно-непрерывно, непрерывно);
- направление и скорость перемещения конвективных ячеек относительно ведущего потока и перемещения облачной системы в целом;
- термодинамические и аэросиноптические условия развития.

Характерные особенности различных типов грозоградовых процессов наиболее отчетливо проявляются на стадии их максимального развития.

Повторяемость различных типов процессов в условиях Северного Кавказа значительно изменяется от года к году в зависимости от состояния атмосферы. Интенсивные ливневые осадки и град в течение всего периода жизни одноячейкового облака, выпадая над одной и той же площадью, обуславливали многочисленные случаи схода селей в горных районах, затопления полей в равнинных районах.

Состояние атмосферы в дни с мощными градовыми процессами различных типов всегда характеризуется повышенной конвективной неустойчивостью и влагосодержанием и существенно отличается лишь пространственной структурой. Градовые процессы различных типов разнесены в пространстве или во времени таким образом, что одновременно в радиусе 50–100 км не наблюдаются двух типов градовых процессов, так как поле ветра в атмосфере не может иметь одновременно две существенно разные структуры. Однако наблюдаются случаи трансформации одного типа в другой. Повторяемость одноячейковых, упорядоченных многоячейковых и суперъячейковых процессов в среднем за 5 лет составила 20, 30 и 10 % соответственно. Остальные 40 % случаев отнесены к неупорядоченным, слабо организованным и промежуточным типам градовых процессов.

Отличительные признаки многоячейковых градовых облаков, по данным работы [4], приведены в таблице.

**Некоторые параметры многоячейковых градовых облаков (эмпирическая модель)
/ Some parameters of multicellular hail clouds (empirical model)**

Параметр	Характеристика
Ячейковая структура облачности	Несколько взаимодействующих ячеек, граничащих друг с другом
Строение конвективных ячеек	Несимметричные
Динамика развития облачной системы	Периодическое обновление процесса за счет зарождения новых и отмирания старых конвективных ячеек
Закономерности зарождения и отмирания ячеек	Периодическое (через 10–20 мин) зарождение на правом фланге новых и отмирающие на левом фланге старых ячеек
Динамика развития конвективных ячеек	Развитие – 10–20 мин, квазистационарное состояние – 10–30 мин и диссипация – 10–20 мин
Направление перемещения	Вправо от ведущего потока на 5–40°
Скорость перемещения V, км/ч	10–70
Максимальная высота радиоэха H _в , км	10–14 км
Максимальная радиолокационная отражаемость на λ = 10 см η, см ⁻¹ 10 · 1gZ _c	5 · 10 ⁻⁹ ÷ 5 · 10 ⁻⁷ 45–65
Максимальный размер в спектре выпадающего града d _{мах} , см	2–5
Площадь выпадения града S, км ²	5–400
Относительная влажность воздуха в слое 1,5–5 км, %	35–90
Повторяемость, %	30

Полученные результаты и их обсуждение

В рамках научных тематик в ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» ведутся работы по анализу и внесению в базу данных параметров всех градовых облаков в пределах видимости метеорологического радиолокатора МРЛ-5 (радиус 130 км), находящегося на научно-исследовательском полигоне «Кызбурун» [5]. Был собран и внесён в базу данных материал по градовым облакам с 2003 по 2022 г. На данный момент она содержит 945 градовых очагов различных типов. На основе обширного материала было решено выделить из общего числа конвективных ячеек типы градовых процессов. Если провести статистическую обработку радиолокационных параметров градовых ячеек всех типов, то можно получить распределение повторяемости времени их жизни (рис. 1). Из рис. 1 видно, что время жизни градовых ячеек варьирует в широких пределах.

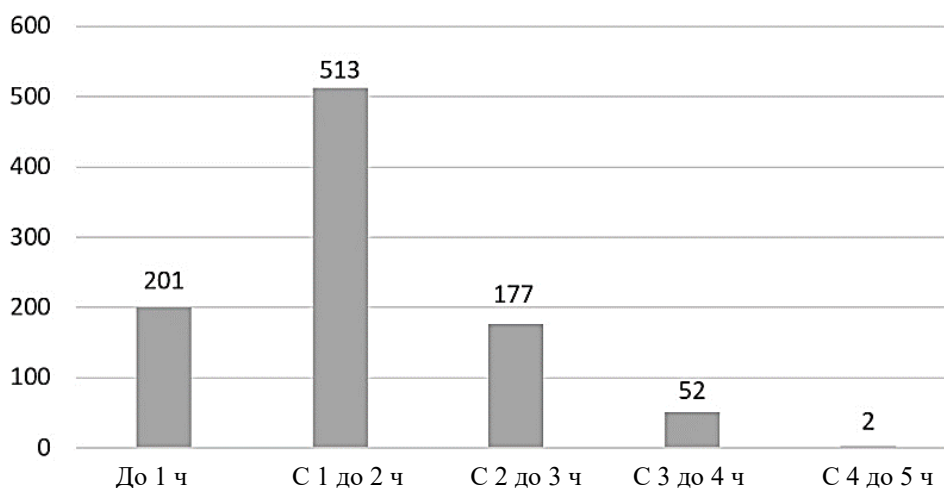


Рис. 1. Время жизни градовых облаков в центральной части Северного Кавказа
 / Fig. 1. Lifetime of hail clouds in the Central part of the North Caucasus

Среднее значение времени жизни для рассмотренных градовых ячеек составило 113 мин при стандартном отклонении 40 мин. Время жизни основной массы градовых ячеек (более 80 %) лежит в пределах 1–3 ч (рис. 1). Полученный результат характерен для всех градовых ячеек независимо от региона наблюдений и типа облаков [6].

По данным отечественных и зарубежных научных источников, время жизни градовой ячейки определяется типом процессов. Ячейки в одноячейковых процессах короткоживущие. Время их жизни не превышает 30–50 мин. Ячейки в неупорядоченных многоячейковых градовых процессах живут дольше. Время жизни таких ячеек составляет 0,5–1,5 ч. Подробнее о одноячейковых градовых процессах в центральной части Северного Кавказа описывается в работах [7, 8]. Время жизни ячеек в многоячейковых упорядоченных и суперъячейковых градовых процессах составляет 3–5 и более часов [9]. На рис. 2 представлена повторяемость времени жизни градовых ячеек в многоячейковых градовых облаках.

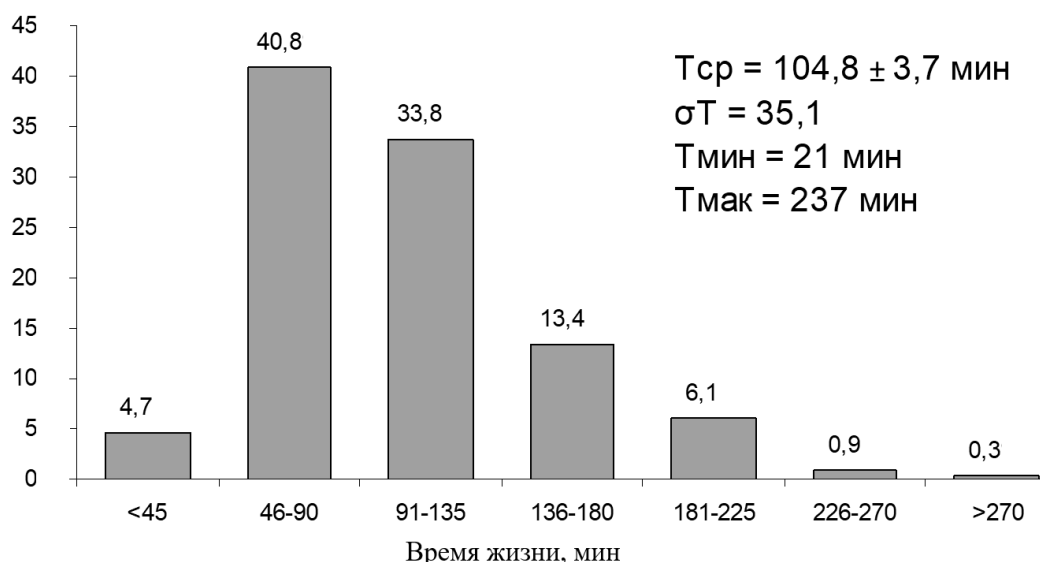


Рис. 2. Повторяемость времени жизни градовых ячеек в многоячейковых градовых облаках, %
 / Fig. 2. Repeatability of the lifetime of hail cells in multicellular hail clouds, %

Для многоячейковых градовых облаков среднее значение времени жизни ячеек составляет 104,8 мин при стандартном отклонении 35,1 мин. Большинство градовых процессов в центральной части Северного Кавказа – многоячейковые градовые процессы.

Также одним из основных радиолокационных параметров градового облака является его отражаемость. Все привыкли измерять радиолокационную отражаемость Z в dBZ, что означает децибел относительно Z [10]. При помощи автоматизированных радиолокаторов имеется возможность проведения микрофизических исследований града. При этом за счет измерений отражаемости осадков в плоскости горизонтальных и вертикальных сечений можно получать поля микрофизических параметров града и их изменчивость во времени и пространстве.

Далее приводятся данные распределений радиолокационных отражаемостей на длине волны Z_{10} . На рис. 3 представлена диаграмма повторяемости радиолокационной отражаемости на длине волны $\lambda=10$ см. Эти данные получены в период максимального развития градовых ячеек.

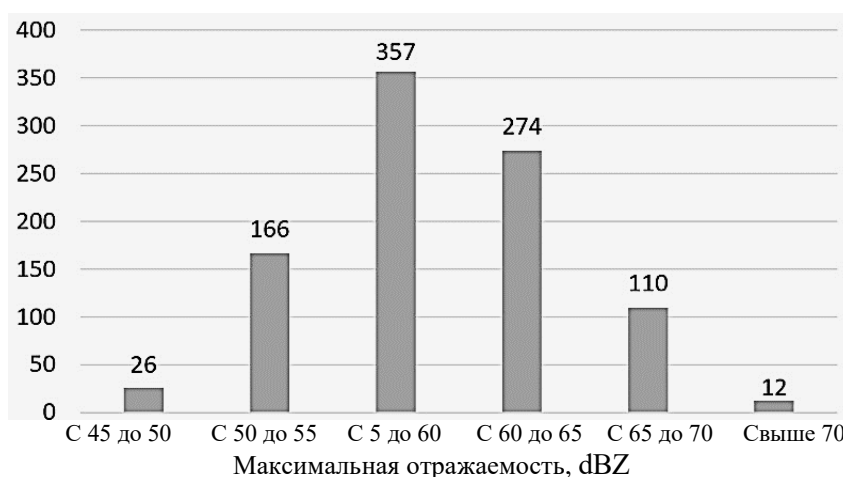


Рис. 3. Повторяемость отражаемости градовых ячеек / Fig. 3. Repeatability of reflectivity of hail cells

Отражаемость Z_{10} изменяется в пределах 45–72 dBZ со средним значением 61,7, стандартное отклонение $\sigma = 5,03$. Подавляющее большинство ячеек имеет отражаемость от 50 до 65 dBZ (рис. 3), а из таблицы видно, что максимальная радиолокационная отражаемость η для многоячейкового градового облака варьирует от $5 \cdot 10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-7}$, что соответствует приблизительно от 50 до 60 dBZ.

На рис. 4 приводится диаграмма повторяемости высот верхней границы радиоэха для градовых облаков всех типов. Сюда входят одноячейковые, многоячейковые и суперъячейковые градовые облака.

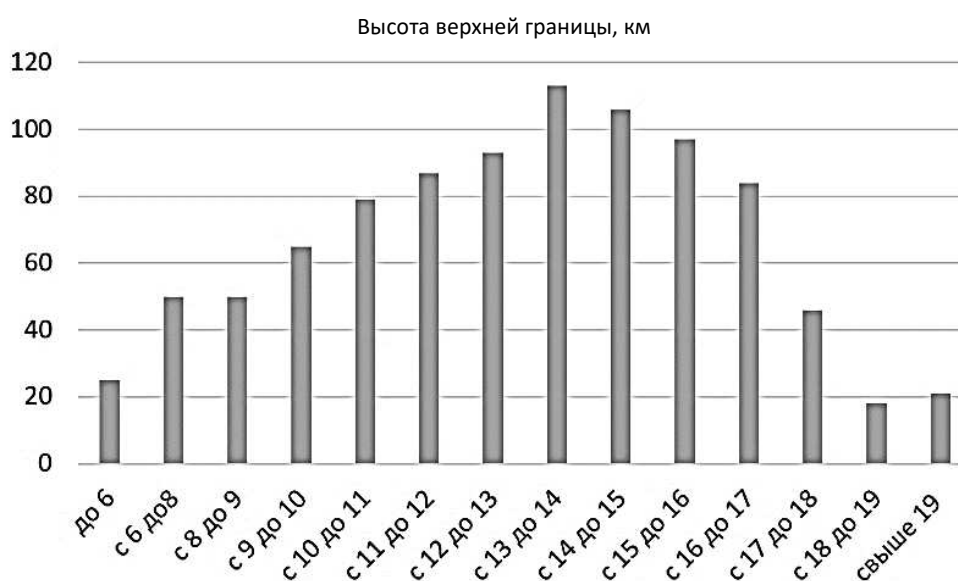


Рис. 4. Повторяемость высоты верхней границы градовых ячеек / Fig. 4. Repeatability of the height of the upper boundary of the hail cells

В 90 % случаев верхняя граница градовых ячеек в период их максимального развития расположена на высоте 8–13,5 км [11], а ячейки с высотой верхней границы больше 10 км составляют 75 %. Среднее значение высоты верхней границы для рассмотренных градовых ячеек составило 11,0 км при стандартном отклонении 1,7. В 80 % случаев верхняя граница градовых ячеек в период их максимального развития расположена на высоте 12–17 км, минимальная высота верхней границы градовой ячейки составила 5,3 км, максимальная – 19,2 км.

Выводы

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем в оперативной работе по засеву градовых облаков, при разработке методов сверхсрочного прогноза градовой активности, а также при сопоставительном анализе результатов численного моделирования градовых облаков с данными экспериментальных исследований. Для специалистов в области численного моделирования особую ценность представляют данные по распределению времени, времени жизни и времени достижения ячейками градового состояния (продолжительности стадии развития). Известно, что именно эти параметры определяют степень реальности воспроизведения в модели коагуляционных процессов, определяющих основные режимы роста града в облаке и формирование конечных спектров выпадающего града.

Список источников

1. Browning K.A., Fankhauser J.C., Chalon J.-P., Eccles P.J., Strauch R.G., Merrem F.H., Musil D.J., May E.L., Sand W.R. Structure of an evolving hailstorm: Synthesis and implications for hail growth and hail suppression // *Monthly Weather Review*. 1976. Vol. 104 (5). P. 603–610.
2. Chisholm A.J., Renick J.H. Supercell and Multicell Alberta Hailstorms // *Proc. Inter. Cloud Physics Conf.* London, 1972. P. 67–68.
3. Marwitz J.D. The structure and motion of severe hailstorm. Part I: Multicell Storms. 1972. P. 180–189. Part III: Severely Sheared Storms. P. 189–201.
4. Абшаев М.Т. Структура и динамика развития грозоградовых процессов Северного Кавказа // *Тр. ВГИ*. 1984. Вып. 53. С. 6–22.
5. Свидетельство № 2017620749. Радиолокационные характеристики градовых облаков. 2017.
6. Инюхин В.С., Куцев С.А., Лиев К.Б., Макитов В.С. Радиолокационные исследования распределения зон формирования первого радиоядра градовых облаков // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 6. С. 691–698.
7. Алита С.Л., Аннаева Ж.Ю. О пространственной эволюции области градообразования в одноячейковых градовых облаках // *Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2021. № 601. С. 116–124.
8. Аннаева Ж.Ю. Статистическая оценка времени градообразования одноячейковых градовых облаков // *Современные проблемы геологии, геофизики и геологии Северного Кавказа : материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием*. М.: Ин-т истории естествознания и техники, 2022. С. 237–240.
9. Макитов В.С., Инюхин В.С., Лиев К.Б., Куцев С.А. Радиолокационные исследования интенсивных градовых процессов в центральной части Северного Кавказа // *Докл. Всерос. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы*. Нальчик, 2021. С. 226–232.
10. Абшаев А. М., Абшаев М.Т., Баркова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик: Печатный двор, 2014. С. 508.
11. Куцев С.А., Лиев К.Б. Исследование характеристик градовых очагов на территории КБР // *Шаг в науку – 2022 : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых*. Нальчик, 2022. С. 144–146.

References

1. Browning K.A., Fankhauser J.C., Chalon J.-P., Eccles P.J., Strauch R.G., Merrem F.H., Musil D.J., May E.L., Sand W.R. Structure of an evolving hailstorm: Synthesis and implications for hail growth and hail suppression. *Monthly Weather Review*. 1976;104(5):603-610.
2. Chisholm A.J., Renick J.H. Supercell and Multicell Alberta Hailstorms. *Proc. Inter. Cloud Physics Conf.* London, 1972:67-68.
3. Marwitz J.D. *The structure and motion of severe hailstorm*. Part 1: Multicell Storms. 1972:180-189. Part III: Severely Sheared Storms. 1972:189-201.

4. Abshaev M.T. Structure and dynamics of development of thunderstorm processes in the North Caucasus. *Trudy VGI = Proceedings of the High-Mountain Geophysical Institute*. 1984;(53):6-22. (In Russ.).
5. Certificate No. 2017620749. *Radar characteristics of hail clouds*. 2017. (In Russ.).
6. Iniukhin V.S., Kushchev S.A., Liev K.B., Makitov V.S. Radar studies of the distribution of zones of formation of the first radio echo of hail clouds. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016;52(6):691-698. (In Russ.).
7. Alita S.L., Appaeva Zh.Yu. On the spatial evolution of the area of hail formation in single-cell hail clouds. *Tr. Gl. geofiz. observatorii im. A.I. Voeykova = Proceedings of the Voeykov Main Geophysical Observatory*. 2021;(601):116-124. (In Russ.).
8. Appaeva Zh.Yu. Statistical estimation of the time of hail formation of single-cell hail clouds. *Modern problems of geology, geophysics and geology of the North Caucasus : materials of the XI All-Russian Scientific-Technical Conference with the international participation*. Moscow: Institute of the History of Natural Science and Technology Press; 2022:237-240. (In Russ.).
9. Makitov V.S., Iniukhin V.S., Liev K.B., Kushchev S.A. Radar studies of intensive hail processes in the central part of the North Caucasus. *Reports of the All-Russian Open Conference on Cloud Physics and active impacts on hydrometeorological processes*. Nalchik, 2021:226-232. (In Russ.).
10. Abshaev A.M., Abshaev M.T., Barekova M.V., Malkarova A.M. *Guidelines for the organization and conduct of anti-hail works*. Nalchik: Pechatnyy dvor Publ.; 2014. 508 p. (In Russ.).
11. Kushchev S.A., Liev K.B. Investigation of the characteristics of hail foci on the territory of the CBD. *Step into science – 2022 : collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of schoolchildren, students, postgraduates and young scientists*. Nalchik, 2022:144-146. (In Russ.).

Информация об авторах

К.Б. Лиев – кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего отделом активных воздействий.
С.А. Куцев – младший научный сотрудник, отдел активных воздействий.

Information about the authors

K.B. Liev - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Acting Head of the Department of Active Influences.
S.A. Kushchev - Junior Researcher, Department of Active Influences.

Статья поступила в редакцию 20.04.2023; одобрена после рецензирования 10.07.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 20.04.2023; approved after reviewing 10.07.2023; accepted for publication 30.10.2023.

Научная статья

УДК 551.58:63(571.15)

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-110-117

ДИНАМИКА СРОКОВ НАСТУПЛЕНИЯ ВЕГЕТАЦИОННОГО ПЕРИОДА ПО ПРИРОДНО-ПОЧВЕННЫМ ЗОНАМ АЛТАЙСКОГО КРАЯ ЗА 1955–2020 ГОДЫ

**Нина Борисовна Максимова^{1✉}, Геннадий Геннадьевич Морковкин²,
Галина Ильинична Ненашева³**

^{1,3}Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

²Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

¹ninmaxim@mail.ru✉

²ggmork@mail.ru

³ngi_geo@mail.ru

Аннотация. Глобальные климатические изменения, наблюдаемые в последние десятилетия, определяют необходимость детальных исследований динамики агрометеорологических показателей, которые, в свою очередь, влияют на биологическую продуктивность агрофитоценозов. Важным является выявление особенностей их проявления на конкретной территории. Алтайский край отличается большим разнообразием природных условий, связанных с наличием равнинных и горных ландшафтов, которые в разной степени аккумулируют и перераспределяют поступающую на земную поверхность солнечную радиацию и осадки. Одним из значимых агроклиматических показателей является продолжительность вегетационного периода, в частности сроки его наступления в весенний период.

Исследования посвящены оценке динамики начала наступления вегетационного периода во времени (в исследовании был вовлечен период 1955–2020 гг.) и прогнозу его наступления в будущем по природным зонам. Для выявления возможного сдвига дат начала вегетационного в конкретных природных зонах за длительный период было проведено его разделение по временным группам (1955–1990 и 1991–2020 гг.) на основании результатов наблюдений, изложенных в Четвертом оценочном докладе Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). В результате исследований выявлено, что в зоне каштановых почв сухих степей в среднем за периоды 1955–1990 и 1991–2020 гг. наблюдается сдвиг начала вегетации на более ранний срок, на 9 дней. В зоне черноземов засушливой и умеренно засушливой степи, а также в зонах черноземов выщелоченных и серых лесных почв средней лесостепи, оподзоленных и выщелоченных, темно-серых и серых лесных почв предгорий Салаира сдвиг начала вегетации наблюдается на более ранний срок – 7–8 дней. Наименьшая динамика даты начала вегетационного периода (5 дней) отмечена в зоне черноземов предгорных равнин, предгорий и низкогорий Алтая в 2 подзонах: черноземов луговой степи предгорий и низкогорий Алтая и черноземов типичных и выщелоченных луговой степи подгорных равнин Алтая.

Ключевые слова: вегетационный период, изменение климата, природно-почвенные зоны Алтайского края

Для цитирования: Максимова Н.Б., Морковкин Г.Г., Ненашева Г.И. Динамика сроков наступления вегетационного периода по природно-почвенным зонам Алтайского края за 1955–2020 годы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 110–117.

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

Original article

ONSET DYNAMICS OF THE GROWING SEASON OF NATURAL-SOIL ZONES OF ALTAI REGION FOR 1955-2020

Nina B. Maximova^{1✉}, Gennadii G. Morkovkin², Galina I. Nenasheva³

^{1,3} Altai State University, Barnaul, Russia

² State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

¹ninmaxim@mail.ru✉

²ggmork@mail.ru

³ngi_geo@mail.ru

Abstract. Global climate changes observed over recent decades have determined the need for more detailed studies of agrometeorological indicator dynamics affecting biological agrophytocenoses productivity; it is important to identify the features of their manifestations in a specific area. Altai region is characterized by a wide range of natural environments due to the combination of lowland and mountainous areas that accumulate and redistribute solar radiation and precipitation on the Earth's surface to varying extents. One of the key agroclimatic indicators is the length of the growing season, particularly its onset in spring.

Research focuses on assessing the dynamics of the onset of the growing season in time (the time span of studies is 1955-2020) and predicting the onset of the growing season for natural zones in the future. To identify a possible shift in the onset dates of the growing season for specific natural zones over a long-term period, we devised two time groups (1955-1990 and 1991-2020) in accordance with the observations from the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. It was revealed that in the zone of chestnut soils of dry steppes, on average for 1955-1990 and 1991-2020, there was a shift in the onset of the growing season to an earlier date, particularly 9 days earlier. The zone of chernozems in the arid and moderately arid steppe, as well as the zone of chernozems of leached and gray forest soils in the middle forest-steppe, podzolized and leached, dark gray and gray forest soils in the foothills of the Salair ridge, demonstrate a shift in the onset of the growing season by 7-8 days earlier. Low dynamics during the onset of the growing season (5 days only) were observed in the zone of chernozems of the foothill plains, foothills, and low mountains of Altai in two subzones: chernozems of the meadow steppe of the foothills and low mountains of Altai and chernozems of typical and leached meadow steppe of the foothills of Altai.

Keywords: vegetation period, climate change, Altai region natural-soil zones

For citation: Maximova N.B., Morkovkin G.G., Nenasheva G.I. Onset Dynamics of the Growing Season of Natural-Soil Zones of Altai Region for 1955-2020. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):110-117. (In Russ.).

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

Введение

Потенциальная продукционная способность фитоценозов напрямую зависит от природных, в том числе климатических, условий территории [1]. Глобальные изменения климата на планете отмечаются исследованиями начиная с 70-х гг. XX в. [2]. Изменения климата, в свою очередь, вносят поправки в ареалы распространения растительных сообществ [3].

Одним из важнейших показателей агроклиматических ресурсов конкретной территории является характеристика вегетационного периода, динамичность которого также весьма актуальна [1, 4, 5]. В Северном полушарии в целом отмечается более раннее наступление весеннего периода [6].

Новизна настоящих исследований заключается в отсутствии сведений о динамике начала вегетационного периода на изучаемой территории в аспекте привязки к конкретным природно-почвенным зонам Алтайского края.

Материалы и методы исследования

Целью данной работы явилась оценка динамики начала наступления вегетационного периода во времени и прогноза его наступления в будущем по природно-почвенным зонам Алтайского края.

Объектами исследования явились даты начала наступления вегетационного периода (переход температуры через +10 °С) по природно-почвенным зонам Алтайского края за 75-летний период (1955–2020 гг.).

Вегетационный период – это период года, в течение которого возможен рост и активное развитие растений (вегетация) в данных климатических условиях [7, 8]. За климатологический признак вегетационного периода принимаются температуры начала и конца вегетации культурных растений [9]. Для территории с умеренным климатом вегетационному периоду соответствует отрезок календарного года, в течение которого среднесуточная температура воздуха превышает 10 °С. С переходом температуры через 10 °С связано начало сева поздних яровых культур и прекращение заморозков.

Исходными данными для расчета трендов изменений сроков начала вегетационных периодов и прогнозирования их временного состояния на краткосрочную перспективу по природно-почвенным зонам территории исследований послужили фондовые материалы Алтайского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (основными источниками информации являются агрометеорологические ежегодники).

Оценка метеорологических показателей была проведена по базовым метеорологическим станциям, действующим на территории Алтайского края и расположенным в следующих природно-почвенных зонах и подзонах: в зоне каштановых почв сухих степей (Славгород); в зоне черноземов засушливой и умеренно засушливой степи в 2 подзонах: в подзоне черноземов южных засушливой степи (Родионо), в подзоне черноземов обыкновенных умеренно засушливой колючей степи (Алейская); в зоне черноземов выщелоченных и серых лесных почв средней лесостепи (Троицкое); в зоне черноземов оподзоленных и выщелоченных, темно-серых и серых лесных почв предгорий Салаира (Тогул); в зоне черноземов предгорных равнин, предгорий и низкогорий Алтая в 3 подзонах: черноземов южных засушливой степи (Горняк), черноземов луговой степи предгорий и низкогорий Алтая (Чарышское), черноземов типичных и выщелоченных луговой степи подгорных равнин Алтая (Бийск – Зональное) [10, 11].

Обработка результатов наблюдений, построение трендов и вычисление уравнений регрессии проведены методами математической статистики по Н.А. Плохинскому [12] с использованием MS Excel.

Результаты и обсуждение

В исследованиях для оценки динамики начала наступления вегетационного периода во времени и прогноза его наступления в будущем в каждой природной зоне были проведены расчеты трендов изменений, включающие 3 временные группы (1955–2020, 1955–1990, 1991–2020 гг.).

Выделение временных периодов по группам 1955–1990 и 1991–2020 гг. проведено на основании результатов наблюдений, изложенных в Четвертом оценочном докладе МГЭИК [13], где приводятся данные о значительной динамике температуры воздуха именно в последние годы. Подобные закономерности были опубликованы также во Втором оценочном докладе Росгидромета (Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring), где приводится графический анализ наблюдаемых изменений (рис. 1).

Для примера в статье приводим графики трендов дат весеннего перехода температуры для 2 наиболее контрастных зон: каштановых почв сухих степей (Славгород) и черноземов луговой степи предгорий и низкогорий Алтая (Чарышское) (рис. 2, 3). Результаты по всем природно-почвенным зонам в цифровом формате приведены в таблице.

Тренды динамики дат весеннего перехода температуры через +10 °С каштановых почв сухих степей (Славгород) представлены на графиках (рис. 2).

Расчетные даты начала вегетации в среднем по периодам 1955–1990 и 1991–2020 гг. (таблица) составляют 7 мая и 28 апреля соответственно. То есть наблюдается сдвиг начала вегетационного периода для данной зоны на более ранний срок на 9 дней.

Расчеты дают возможность сделать прогноз смещения даты наступления вегетационного периода в зоне каштановых почв сухой степи к 2025 г. на более ранний срок на 1–2 дня (26–27 апреля).

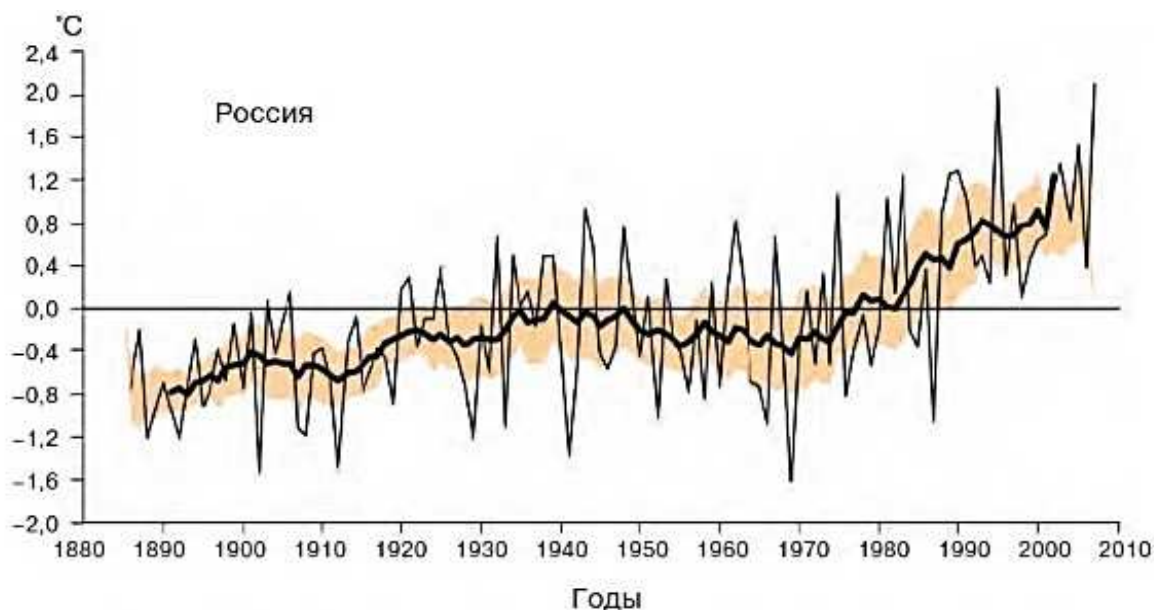


Рис. 1. Изменения среднегодовой приземной температуры воздуха, °С, осредненной по территории России, в отклонениях от средних за 1961–1990 гг. (тонкая линия показывает результаты наблюдений по станциям, жирная – сглаженный ход температуры воздуха (11-летние скользящие средние))
 / Fig. 1. Changes in the average annual surface air temperature, °С, averaged over the territory of Russia, in deviations from the average for 1961–1990 (the thin line shows the results of observations by stations, the bold line shows the smoothed course of air temperature (11-year moving averages))

Тренды динамики дат весеннего перехода температуры через +10 °С черноземов луговой степи предгорий и низкогорий Алтая (Чарышское) представлены на графиках (рис. 3).

В луговой степи предгорий и низкогорий Алтая расчетные даты начала вегетации в среднем по периодам 1955–1990 и 1991–2020 гг. (таблица) составляют 10 и 5 мая соответственно. То есть наблюдается сдвиг начала вегетационного периода для данной зоны на более ранний срок на 5 дней. Прогноз смещения даты наступления вегетационного периода в данной зоне к 2025 г. на более ранний срок на 1 день (4 мая).

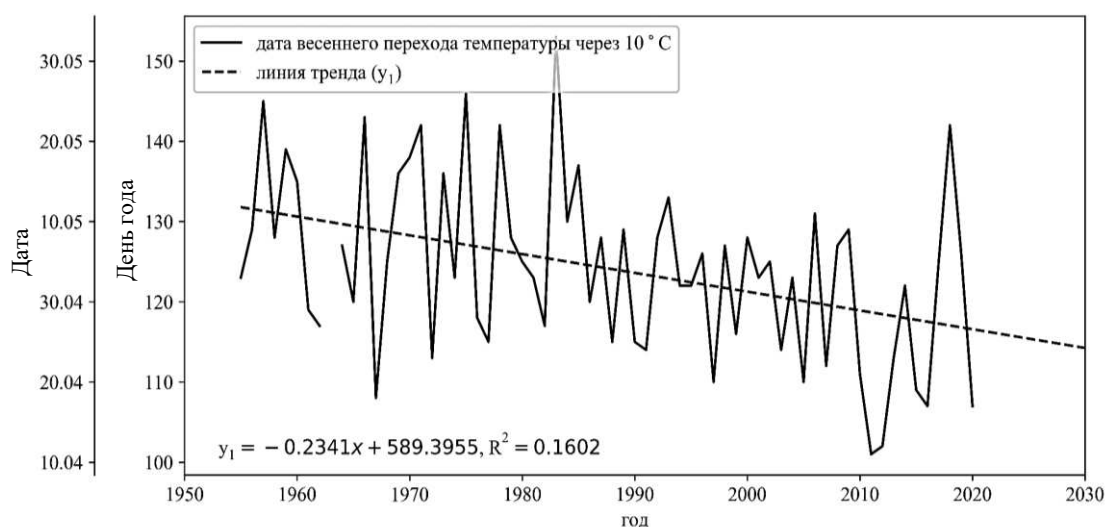
В связи с наблюдаемым изменением глобального климата в конце XX – начале XXI в. оценка агроклиматических ресурсов территории является значимой для характеристики продукционной способности сельскохозяйственных культур [14, 15]. При этом особое внимание уделяется вегетационному периоду. В настоящее время данные по динамике начала вегетационного периода крайне вариативны [1, 4–6].

Вместе с тем динамика протекания весенней фенологии растений территориально различна. Западноевропейская весна начинается раньше из-за интенсивного потока более теплых атлантических воздушных масс; восточная часть Европы отличается другим фенологическим ритмом и тенденциями, что можно объяснить влиянием сибирского максимума [16].

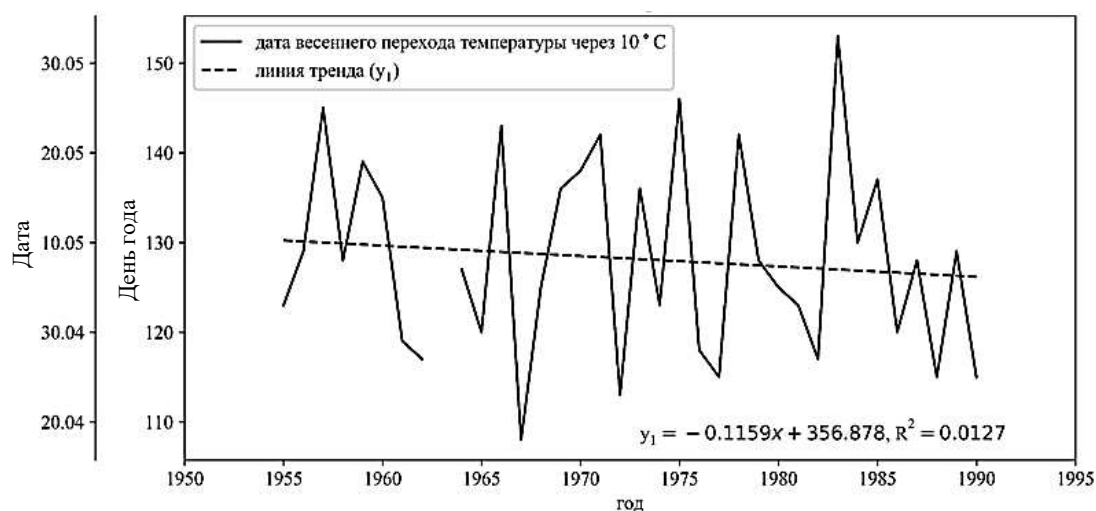
Таким образом, важным является наличие достоверной актуальной информации, привязанной к конкретной территории, в частности к природно-почвенным зонам Алтайского края. Данные вопросы решаются настоящими исследованиями.

Средние даты весеннего перехода температуры через +10 °С
 / Average dates of spring temperature transition through +10 °С

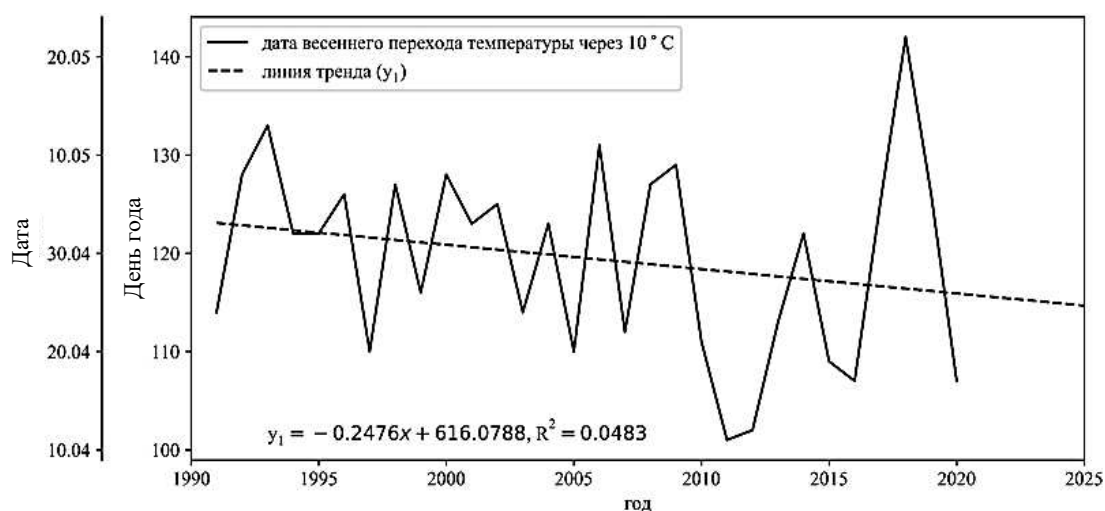
Период	Метеостанция							
	Славгород	Родино	Алейск	Троицкое	Тогул	Горняк	Чарыш	Бийск
До 1990 г.	07 мая	07 мая	08 мая	13 мая	13 мая	06 мая	10 мая	10 мая
После 1990 г.	28 апр.	29 апр.	01 мая	06 мая	06 мая	28 апр.	05 мая	05 мая
Кол-во дней сдвига	-9	-8	-7	-7	-7	-8	-5	-5



а/а

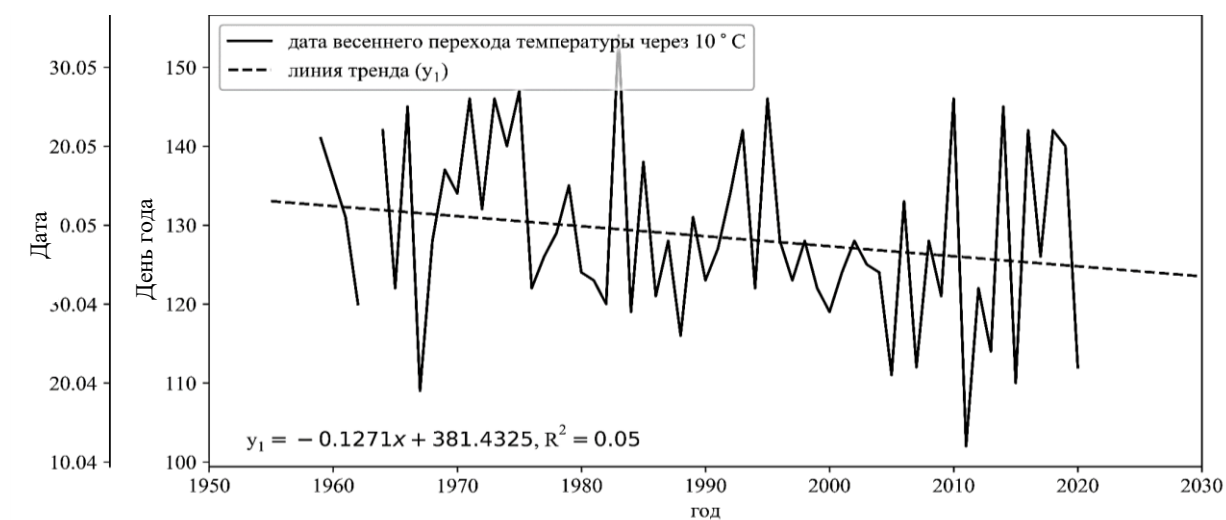


б/б

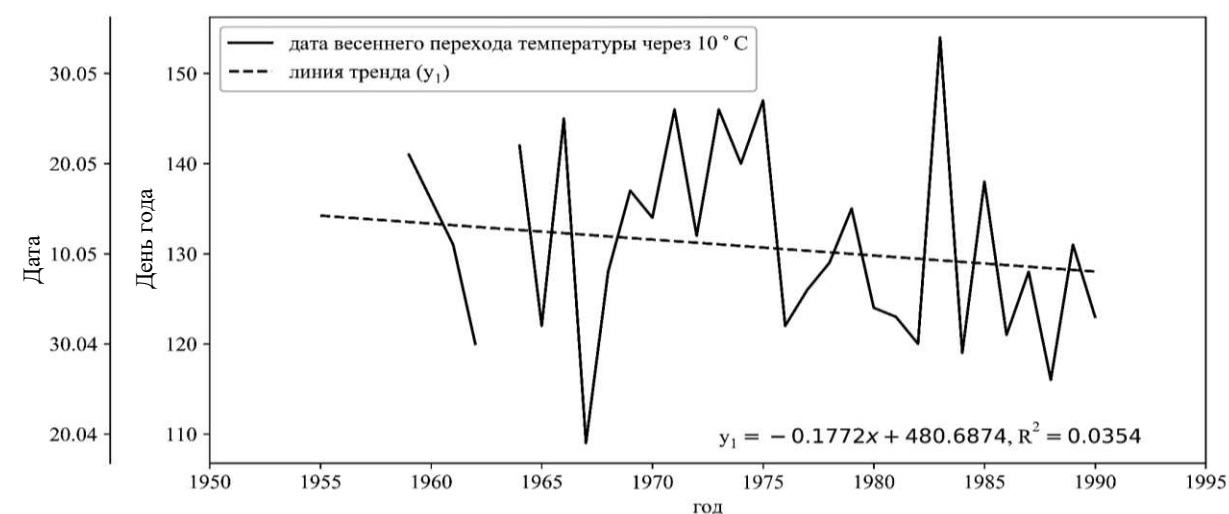


в/с

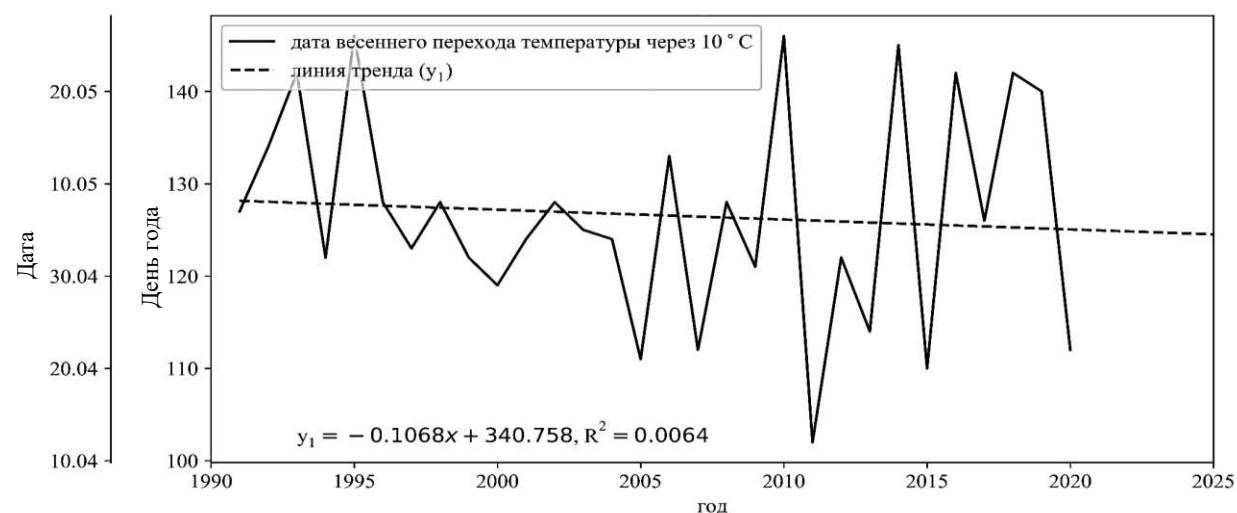
Рис. 2. Динамика дат весеннего перехода температуры через $+10^{\circ}\text{C}$, линия тренда изменения начала наступления вегетационного периода, Славгород: а – в 1955–2020 гг.; б – в 1955–1990 гг.; в – в 1991–2020 гг.
 / Fig. 2. The dynamics of the dates of the spring temperature transition through $+10^{\circ}\text{C}$, the trend line of the change in the beginning of the onset of the growing season, Slavgorod: а - 1955-2020; б - 1955-1990; с - 1991-2020



a/a



б/б



в/в

Рис. 3. Динамика дат весеннего перехода температуры через $+10^{\circ}\text{C}$, линия тренда изменения начала наступления вегетационного периода, Чарышское: а – в 1955–2020 гг.; б – в 1955–1990 гг.; в – в 1991–2020 гг.
/ Fig. 3. The dynamics of the dates of the spring temperature transition through $+10^{\circ}\text{C}$, the trend line of the change in the beginning of the onset of the growing season, Charyshskoe: a - 1955-2020; b - 1955-1990; c - 1991-2020

Выводы

Настоящее исследование позволяет оценить изменения климатических характеристик территории по природным зонам Алтайского края и вносит значимый вклад в прогнозирование формирования продукционной способности агрофитоценозов.

В результате проведенной научной работы можно сделать вывод о том, что на всей территории края происходит увеличение вегетационного периода. Смещение дат наступления его весной на более ранний срок составляет 5–9 дней. Наибольшее изменение наблюдается в районах сухой и засушливой степей.

В подзонах луговых степей на подгорных равнинах и луговых степей предгорий и низкогорий Алтая смещение минимальное (5 дней), что обусловлено влиянием орографических условий на формирование климата данной территории, в частности, при приближении к горам резко усиливается деятельность атлантических циклонов, следствием чего является увеличение облачности и количества осадков, повышение зимних и понижение летних температур воздуха, т.е. смягчение континентальности климата [11].

Можно прогнозировать дальнейшее смещение даты начала вегетации на более ранний период (на 1–2 дня к 2025 г.) с большей вероятностью для степных равнинных территорий края.

Список источников

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
2. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
3. Туткова Т.Б., Виноградова В.В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 3. С. 75–86.
4. Максимова Н.Б., Арнаут Д.В., Морковкин Г.Г. Оценка изменения продолжительности вегетационного периода по агроклиматическим районам Алтайского края // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2014. № 10 (120). С. 49–53.
5. Maximova N., Kantamaneni K., Morkovkin G., Arnaut D., Rice L. The Transformation of Agro-Climatic Resources of the Altai Region under Changing Climate Conditions // Agriculture. 2019. Vol. 9(4). P. 68. <https://doi.org/10.3390/agriculture9040068>.
6. Schwartz M.D., Ahas R., Aasa A. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere // Global Change Biology. 2006. Vol. 12. P. 343–351.
7. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Т. 1: А-И / под ред. А.И. Бедрицкого. СПб.; М.: Летний сад, 2008. 336 с.
8. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
9. Кельчевская Л.С. Методы обработки наблюдений в агроклиматологии. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 215 с.
10. Бурлакова Л.М., Татаринцев Л.М., Рассыпнов В.А. Почвы Алтайского края. Барнаул: Алтайский СХИ, 1988. 72 с.
11. Карманов И.И. Почвы предгорий Северо-Западного Алтая и их использование в сельском хозяйстве. М.: Наука, 1965. 158 с.
12. Плохинский Н.А. Биометрия. М.: Изд-во МГУ, 1970. 367 с.
13. МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007 г.: обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Р.К. Пачаури, А.Райзингер и др. Женева, Швейцария, 2007. 104 с.
14. Чирков Ю.И. Агрометеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 296 с.
15. Максимова Н.Б. Почвенно-климатические ареалы продуктивности зерновых культур Алтайского края: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Барнаул, 1995. 19 с.
16. Ahas R., Aasa A., Menzel A., Fedotova V.G., Scheifinger H. Changes in European spring phenology // Int. J. Climatol. 2002. Vol. 22. P. 1727–1738.

References

1. *Second Rosgidromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation*. Moscow: Rosgidromet Publ.; 2014. 58 p. (In Russ.).

2. Gruza G.V., Rankova E.Ya. *Observed and expected climate change in Russia: Air temperature*. Obninsk: All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center Press; 2012. 194 p. (In Russ.).
3. Titkova T.B., Vinogradova V.V. Vegetation response to climate change in boreal and subarctic landscapes in the early 21st century. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. 2015;12(3):75-86. (In Russ.).
4. Maximova N.B., Arnaut D.V., Morkovkin G.G. Assessment of changes in the growing season duration in the Altai region agro-climatic areas. *Vestn. Altayskogo gos. agrar. un-ta = Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2014;(10):49-53. (In Russ.).
5. Maximova N., Kantamaneni K., Morkovkin G., Arnaut D., Rice L. The transformation of agro-climatic resources of the Altai Region under changing climate conditions. *Agriculture*. 2019;9(4):68, <https://doi.org/10.3390/agriculture9040068>.
6. Schwartz M.D., Ahas R., Aasa A. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*. 2006;12:343-351.
7. Bedritsky A.I., ed. *Russian hydro meteorological encyclopedic dictionary*. Saint Petersburg; Moscow: Letniy sad Publ.; 2008. Vol. 1. 336 p. (In Russ.).
8. Khromov S.P., Mamontova L.I. *Meteorological dictionary*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1974. 568 p. (In Russ.).
9. Kelchevskaya L.S. *Processing observations methods in agroclimatology*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1971. 215 p. (In Russ.).
10. Burlakova L.M., Tatarintsev L.M., Rassypnov V.A. *Altai Region soils*. Barnaul: Altai Agricultural Institute Press; 1988. 72 p. (In Russ.).
11. Karmanov I.I. *Foothills Northwestern Altai soils and their use in the agriculture*. Moscow: Nauka Publ.; 1965. 158 p. (In Russ.).
12. Plokhinsky N.A. *Biometrics*. Moscow: Moscow State University Press; 1970. 367 p. (In Russ.).
13. Pachauri R.K., Risinger A. et al. *IPCC, 2007: Climate Change, 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2007. 104 p. (In Russ.).
14. Chirkov Yu.I. *Agrometeorology*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1986. 296 p. (In Russ.).
15. Maximova N.B. *Soil and climatic areas of grain crops productivity of Altai Krai*. Dissertation Thesis. Barnaul, 1995. 19 p. (In Russ.).
16. Ahas R., Aasa A., Menzel A., Fedotova V.G., Scheifinger H. Changes in European spring phenology. *Int. J. Climatol.* 2002;22:1727-1738.

Информация об авторах

Н.Б. Максимова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры природопользования и геоэкологии.

Г.Г. Морковкин – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры геоэкологии и природопользования.

Г.И. Ненасьева – кандидат географических наук, доцент, заведующая кафедрой физической географии и геоинформационных систем.

Information about the authors

N.B. Maximova - Candidate of Science (Agriculture), Associate Professor, Associate Professor of Department of Nature Management and Geoecology.

G.G. Morkovkin - Doctor of Science (Agriculture), Professor, Professor of Department of Geoecology and Nature Management.

G.I. Nenasheva - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Head of the Department of Physical Geography and Geoinformation Systems.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 30.10.2023. The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 30.10.2023.

Научная статья

УДК 574.64 (477.75)

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-118-125

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
СЕВЕРО-КРЫМСКОГО КАНАЛА ПЕРЕД ЗАПУСКОМ ОСНОВНОГО
ПОТОКА ВОДЫ ПО СОДЕРЖАНИЮ УГЛЕВОДОРОДОВ
И НЕКОТОРЫМ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ
(ВЕСНА 2022 г., ПОЛУОСТРОВ КРЫМ)**

Н.Ю. Мирзоева¹, О.В. Соловьёва², Ю.В. Дорошенко³✉, Е.А. Тихонова⁴, Н.В. Бурдиян⁵

^{1,2,3,4,5}Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

¹natmirz@mail.ru

²kozl_ya_oly@mail.ru

³julia_doroshenko@mail.ru✉

⁴tihonoval@mail.ru

⁵burdiyan@mail.ru

Аннотация. Весной 2014 г. прекратилась подача днепровской воды в Северо-Крымский канал (СКК), который ранее использовался для централизованного водоснабжения и сельского хозяйства в степной части Крыма. Спустя 8 лет активное использование в Крыму днепровской воды требует комплексных исследований её качества. Традиционно для оценки экологического состояния акваторий применяют микробиологические исследования. Кроме того, важным является мониторинг таких компонентов углеводородного происхождения, как алифатические углеводороды. В целом воды СКК по микробиологическим показателям (численность гетеротрофных, липолитических и углеводородоокисляющих бактерий) и концентрации углеводородов можно отнести к олигосапробной, слабозагрязнённой зоне. По уровню алифатических углеводородов донные отложения исследуемого участка СКК и почва на прилегающей к каналу территории относятся к природно-чистым.

Ключевые слова: Северо-Крымский канал, углеводороды, гетеротрофные бактерии, липолитические бактерии, углеводородоокисляющие бактерии, биоиндикация, качество воды, полуостров Крым

Для цитирования: Мирзоева Н.Ю., Соловьёва О.В., Дорошенко Ю.В., Тихонова Е.А., Бурдиян Н.В. Оценка качества воды и донных отложений Северо-Крымского канала перед запуском основного потока воды по содержанию углеводородов и некоторым микробиологическим показателям (весна 2022 г., полуостров Крым) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 118–125.

Благодарности: авторы выражают благодарность ведущим инженерам отдела радиационной и химической биологии ФИЦ ИнБЮМ И.Н. Мосейченко и Д.Б. Евтушенко за помощь в отборе проб.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ № 23-26-00128.

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

Original article

ASSESSMENT OF WATER QUALITY AND BOTTOM SEDIMENTS OF THE NORTH CRIMEAN CANAL BEFORE THE LAUNCH OF THE MAIN FLOW OF WATER BY THE CONTENT OF HYDROCARBONS AND SOME MICROBIOLOGICAL INDICATORS (SPRING 2022, CRIMEAN PENINSULA)

N.Yu. Mirzoeva¹, O.V. Soloveva², Yu.V. Doroshenko³, E.A. Tikhonova⁴, N.V. Burdiyan⁵

^{1,2,3,4,5}A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

¹natmirz@mail.ru

²kozl_ya_oly@mail.ru

³julia_doroshenko@mail.ru

⁴tihonoval@mail.ru

⁵burdiyan@mail.ru

Abstract. *In the Spring 2014, the supply of Dnieper water to the North Crimean Canal (NCC) was stopped. The canal was previously used for centralized water supply and agriculture in the steppe part of Crimea. After 8 years, the active use of the Dnieper water in the Crimea requires comprehensive studies of its quality. Traditionally, microbiological studies are used to assess the ecological condition of water areas. In addition, it is important to monitor components of hydrocarbon origin such as aliphatic hydrocarbons. In general, the NCC waters by microbiological parameters (the number of heterotrophic, lipolytic and hydrocarbon-oxidizing bacteria) and the concentration of hydrocarbons can be attributed to the oligosapropic, low-polluted zone. According to the level of aliphatic hydrocarbons, the bottom sediments of the studied section of the NCC and the soil in the area adjacent to the canal are classified as naturally pure.*

Keywords: *North Crimean Canal, hydrocarbons, heterotrophic bacteria, lipolytic bacteria, hydrocarbon-oxidizing bacteria, bioindication, water quality, Crimean Peninsula*

For citation: *Mirzoeva N.Yu., Soloveva O.V., Doroshenko Yu.V., Tikhonova E.A., Burdiyan N.V. Assessment of Water Quality and Bottom Sediments of the North Crimean Canal Before the Launch of the Main Flow of Water by the Content of Hydrocarbons and Some Microbiological Indicators (Spring 2022, Crimean Peninsula). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):130-137. (In Russ.).*

Acknowledgments: *the authors appreciate deeply the lead engineers of the Radiation and Chemical Biology Department (IBSS) I.N. Moseichenko and D.B. Evtushenko for help with sampling.*

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-26-00128.

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

В 2022 г. на территории Крыма была запущена вода по высохшему ранее руслу Северо-Крымского канала (СКК). Помимо обеспечения водой маловодных и засушливых территорий Крымской области, канал имел важное значение для восполнения запасов артезианских вод степной части Крымского полуострова, широко используемых для централизованного водоснабжения городов, сёл и орошения сельхозугодий [1]. Поступление днепровской воды через фильтрационные бассейны производственной установки искусственного пополнения подземных вод, работавшей в 80-х гг. XX в., препятствовало проникновению солёных вод вглубь территории Крыма. С другой стороны, обильное орошение и инфильтрация из канала вызвали в пределах Присивашья повышение уровня грунтовых вод и засоление почв. Развитие дренажной сети привело к увеличению сбросов возвратных вод оросительных систем, загрязнённых удобрениями и пестицидами, в природные водные объекты, включая заливы Чёрного моря [2].

Весной 2014 г. прекратилась подача днепровской воды в СКК, что привело к сокращению поливных площадей. За эти годы на некоторых участках произошло снижение уровня грунтовых вод, что благотворно повлияло на улучшение солевого режима почв, так как произошло снижение солевого горизонта [2, 3]. В настоящее время, после подачи воды в СКК, в наливные водохранилища Крымского полуострова поступило свыше 100 млн м³ воды [4].

Для успешного обеспечения человека питьевой водой необходим контроль её качества. В настоящее время контролируется более 100 параметров качества воды, используемой для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения [5]. Даже проведение полного анализа по всем установленным показателям не даёт возможности определить их комплексное воздействие. Существующая в настоящее время система мониторинга загрязнения водных объектов, основанная на определении аналитическими методами отдельных токсических веществ, не обеспечивает сохранения экологического благополучия водоёмов [6].

Традиционно важное место в оценке экологического состояния акваторий занимают микробиологические исследования, так как бактерии, в силу своих физиологических особенностей, довольно быстро реагируют изменением количественного состава даже на незначительные изменения параметров среды обитания [7]. Количественные показатели гетеротрофной группы бактерий, основных деструкторов органического вещества в водоёмах, значимо коррелируют со степенью трофности последних [8]. Распределение липолитических микроорганизмов, обладающих ферментом липазой и способных разлагать жиры, носит характер, сходный с распределением нефтеокисляющих бактерий – прямых индикаторов загрязнения нефтью и нефтепродуктами. Липиды и липидоподобные вещества обычно попадают в воду с береговым стоком, а также с продуктами жизнедеятельности фито- и зоопланктона, образуются при микробном окислении n-алканов нефти. Максимумы численности липолитических микроорганизмов приурочены к местам сброса хозяйственно-бытовых сточных вод. Они наблюдаются в районах, подвергающихся хроническому нефтяному загрязнению, а также совпадают по времени с периодами массового развития зоо- и фитопланктона в условно чистых акваториях [9].

Кроме того, при организации защиты водных объектов важным является мониторинг таких компонентов углеводородного происхождения, как алифатические углеводороды (АУВ). Эти вещества относятся к сравнительно устойчивым органическим соединениям, которые накапливаются и длительное время сохраняются в водоёмах [10].

Известно [11], что в первые два года существования водного объекта значительную роль в формировании качества воды играет поступление веществ из затопленных почв, а также древесной и луговой растительности. Учитывая тот факт, что в дальнейшем именно донные отложения представляют наибольший интерес при оценке потоков загрязняющих веществ в водоёмах [12], необходимо контролировать качество не только донных отложений канала, но и близлежащих сельскохозяйственных угодий, для полива которых используется вода из СКК.

Цель работы – оценить качество воды и донных отложений СКК по концентрации в них углеводородов и некоторым микробиологическим параметрам (численность гетеротрофных, углеводородокисляющих и липолитических групп бактерий) до начала запуска по каналу основных объёмов воды.

Материал и методы исследования

Материалом для настоящей работы послужили пробы воды, отобранные в акватории СКК весной 2022 г. на трёх станциях в районе Армянска (А1, А2 и А3) и трёх станциях в Джанкойском районе (Дж1, Дж2 и Дж3) (рис. 1), а также пробы донных отложений и почв с прилегающей к СКК территории.

Для проведения микробиологических исследований пробы воды отбирали в стерильные пробы объёмом 50 см³. Определение численности исследуемых групп бактерий проводили методом предельных десятикратных разведений с использованием элективных питательных сред. Для гетеротрофных бактерий (ГБ) использовали среду с пептоном [13]. Для углеводородокисляющих бактерий (УОБ) применяли среду Ворошиловой – Диановой [14], в качестве единственного источника углерода и энергии добавляли стерильную нефть (1 % от объёма). Липолитические бактерии (ЛБ) выделяли по [15].

Транспортировка проб воды для определения в ней концентрации углеводородов осуществлялась в день отбора в специальных ёмкостях объёмом 1 л. Почва и донные отложения отбирались ручным пробоотборником, высушивались в лаборатории, перетирались и просеивались через сито с диаметром ячеек 0,25 мм для дальнейшего определения в них содержания АУВ.

Определение углеводородов в воде, донных отложениях и почве проводили на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ [16, 17].

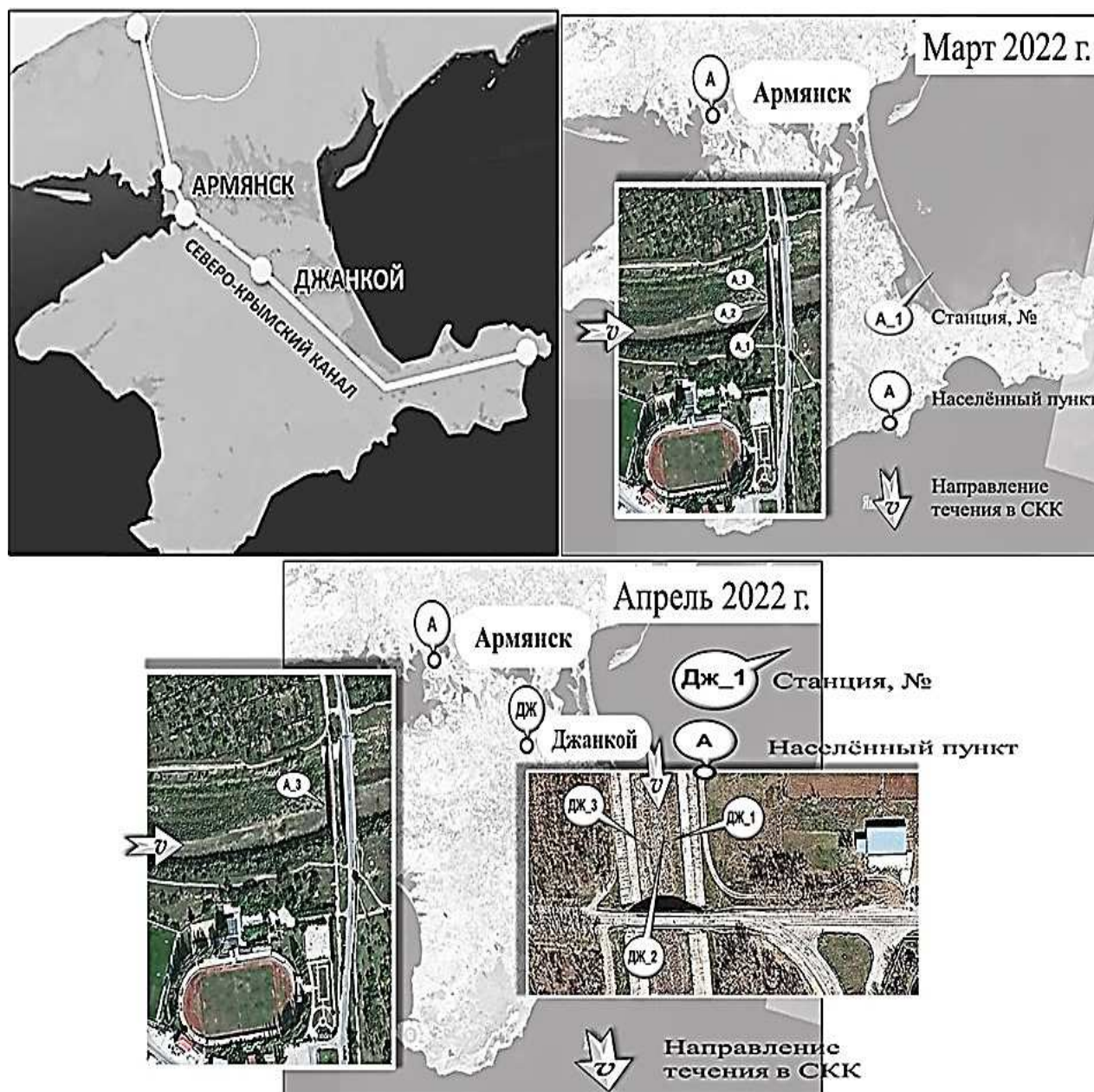


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды и донных отложений в СКК (п-ов Крым) весной 2022 г.
/ Fig. 1. Study area and sampling sites of water and sediment in the North Crimean Canal
(Crimean Peninsula) in the Spring 2022

В лабораторных условиях из воды экстрагировали углеводороды гексаном. Аликвотную часть сконцентрированного экстракта (1 мкл) вводили микрошприцем в нагретый до 250 °С испаритель газового хроматографа «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором. Разделение углеводородов осуществляли на капиллярной колонке НТ8 25 м × 0,32 мм с толщиной неподвижной фазы 0,25 мкм (SGE Analytical Science). Температура колонки программировалась от 40 до 330 °С (скорость подъема температуры 10 °С/мин). Поток газа-носителя (гелий) в колонке – 2,5 мл/мин без деления потока. Температура детектора 320 °С. Количественное определение суммарного содержания углеводородов проводили путем абсолютной калибровки пламенно-ионизационного детектора (ПИД) смесью углеводородов. В качестве последней использовали стандартный образец ASTM D2887 Reference Gas Oil (фирма SUPELCO, США). Для обработки результатов использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0», метод абсолютной калибровки и процентной нормализации [17].

Наиболее вероятное число микроорганизмов в единице объема рассчитано по таблице МакКреди (в трёх повторностях), основанной на методе вариационной статистики [18].

Результаты и обсуждение

Концентрация углеводородов в воде исследуемого участка СКК весной 2022 г. в среднем составляла 0,032 мг/л в районе Армянска и 0,035 мг/л – в Джанкойском районе (рис. 2). Полученные показатели ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) для рыбохозяйственных водоёмов (0,05 мг/л) [19].

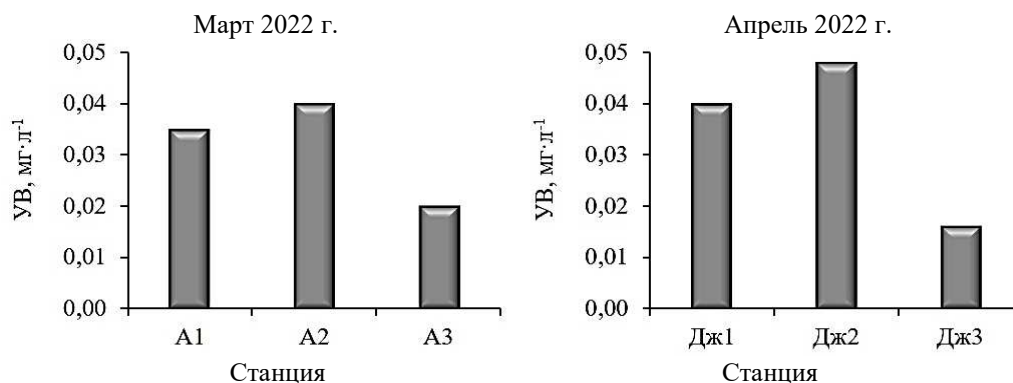


Рис. 2. Концентрация углеводородов в воде СКК в районе г. Армянска и Джанкойского района / Fig. 2. Concentration of hydrocarbons in the water of the North Crimean Canal near the town of Armyansk and Dzhankoy area

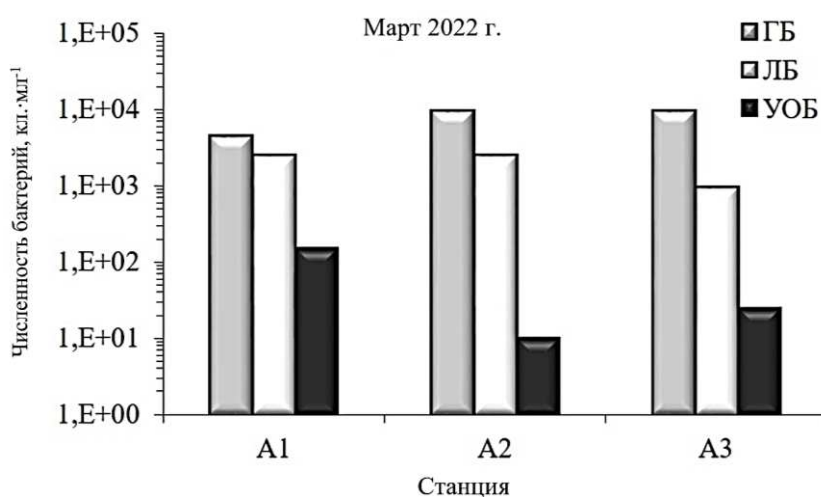


Рис. 3. Численность ГБ, ЛБ, УОБ в воде на исследуемых станциях в марте 2022 г., кл./мл / Fig. 3. Abundance of heterotrophic, lipolytic, hydrocarbon-oxidizing bacteria in the water at the studied stations in March 2022, cells/ml

Проведённые микробиологические исследования воды СКК в марте 2022 г. в районе г. Армянска по оценке численности гетеротрофной группы бактерий показали, что значения ГБ на обозначенных станциях не превышали третьего порядка (рис. 3), равнозначные количественные показатели выявлены на ст. А2 и А3.

УОБ высеяны из всех проб воды, в широком диапазоне: от 10 до 150 кл./мл (рис. 3), причём их количество составляло 0,1–3,3 % от общей численности гетеротрофных бактерий.

Липолитическая группа бактерий выделена повсеместно (рис. 3), отмечен значительный

рост данной группы во всех пробах. Равнозначная численность ЛБ выявлена на ст. А1 и А2, на порядок ниже – на ст. А3. Следует отметить, что процессы самоочищения от липидных компонентов активно протекают в воде СКК. Численность этой группы составляла 10–55 % от общей численности ГБ.

Относительно высокая численность всех исследуемых групп бактерий отмечена у правого берега СКК (на ст. А1). Минимальная численность УОБ зафиксирована в воде центральной части СКК в районе г. Армянска.

По результатам микробиологических исследований воды СКК в апреле 2022 г. в Джанкойском районе отмечено, что численность гетеротрофной группы бактерий также не превышает третьего порядка (рис. 4). Максимальное значение ГБ (9500 кл./мл) соответствует воде у правого берега, а минимальное (750 кл./мл) – у левого берега СКК.

Численность УОБ составляла 0,5–12,7 % от общей численности гетеротрофных бактерий, что свидетельствует о протекающих процессах микробного разложения НУ, особенно у левого берега СКК в Джанкойском районе.

ЛБ определяли только в воде центральной части СКК. Численность этой группы бактерий на порядок превышала численность УОБ и составляла 250 кл./мл.

Продолжающийся мониторинг микробиологических показателей в воде СКК в районе г. Армянска позволил отметить снижение численности ГБ и ЛБ (рис. 5).

В апреле 2022 г. численность УОБ составила 10 % от общего числа ГБ, хотя в марте это соотношение не превышало 0,3 %. Полученные данные характеризуют активизацию процессов микробного самоочищения вод СКК.

В целом поверхностные воды на исследуемых участках СКК по показателям численности ГБ можно отнести к олигосапробной, слабозагрязнённой зоне [8].

Концентрация УВ в донных отложениях исследуемого участка СКК составляла 3,0 мг/100 г возд.-сух.д.о., что соответствует природно-чистым акваториям [20]. В почве, отобранной с прилегающих к каналу сельхозугодий, содержание АУВ равнялось 1,81 мг/100 г, на н-алканы при этом приходилось 1,12 мг/100 г. Зафиксированные количества УВ являются невысокими и характеризуют как благополучные относительно нефтяного загрязнения почвы и донные отложения [16, 20].

В апреле 2022 г. в донных отложениях СКК общая численность ГБ составляла $2,5 \times 10^7$ кл./г, а в почве – на 2 порядка меньше ($7,5 \times 10^5$ кл./г). Численность ЛБ в донных отложениях превышала $2,5 \times 10^5$ кл./г, а в почве зафиксировано значение $9,5 \times 10^4$ кл./г. При этом разницу по количеству УОБ на разных станциях выявить не удалось ($>2,5 \times 10^4$ кл./г).

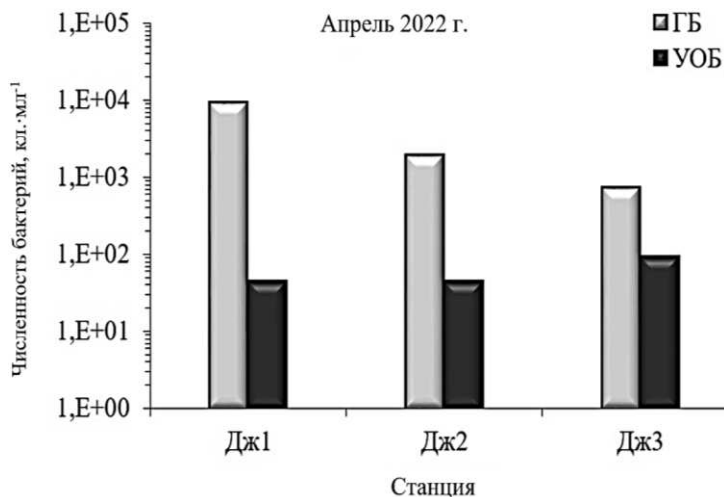


Рис. 4. Численность ГБ и УОБ в воде на исследуемых станциях в апреле 2022 г., кл./мл / Fig. 4. Abundance of heterotrophic and hydrocarbon-oxidizing bacteria in the water at the studied stations in April 2022, cells/ml

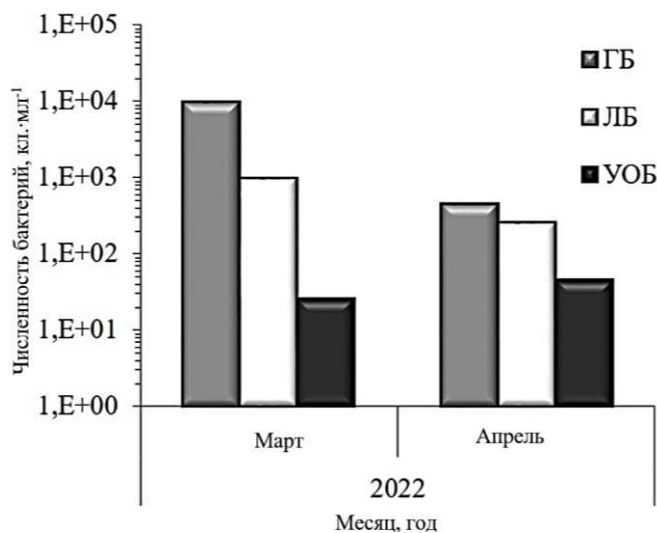


Рис. 5. Численность ГБ, ЛБ, УОБ в воде у левого берега СКК весной 2022 г., кл./мл / Fig. 5. The abundance of the heterotrophic, lipolytic, hydrocarbon-oxidizing bacteria in the water near the left bank of the NCC in spring 2022, cells/ml

Заключение

В целом поверхностные воды СКК по полученным в исследуемый период показателям численности ГБ можно отнести к олигосапробной зоне. Концентрации углеводов в водах канала свидетельствуют о наличии слабого загрязнения данным поллютантом. По содержанию АУВ донные отложения исследуемого участка СКК, а также почва с прилегающей к каналу территории относятся к природно-чистым. Для дальнейшей оценки и прогноза качества воды СКК по выбранным химическим и микробиологическим показателям необходимо продолжение мониторинговых наблюдений.

Список источников

1. Шароварина Е.С. Влияние Северо-Крымского канала на экологию Крыма. URL: <http://www.gpntb.ru/win/inter-events/crimea2018/disk/006.pdf> (дата обращения: 10.02.2023).
2. Ляшевский В.И., Вердыш М.В. Мелиоративная характеристика орошаемых земель Крыма // Науч. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2018. № 3(31). С. 86–99. Doi: 10.31774/2222-1816-2018-3-86-99.
3. Хитров Н.Б., Клименко О.Е., Роговнева Л.В., Дунаева Е.А., Попович В.Ф. Долговременные последствия орошения почв водами Северо-Крымского канала в садах // Тавр. вестн. аграрной науки. 2017. № 1(9). С. 87–98.
4. URL: <https://crimea.ria.ru/20221108/skolko-vody-poluchil-krym-posle-otkrytiya-severo-krymskogo-kanala-1125278686.html> (дата обращения: 10.02.2023).
5. СанПин 2.1.4.2580-10. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества // Бюл. нормативных актов фед. органов исполнительной власти. 2010. № 14.
6. Ложкина Р.А., Томилина И.И., Ганеева М.В. Долговременные изменения качества воды Рыбинского водохранилища по данным биотестирования // Трансформация экосистем. 2020. Т. 3, № 3(9). С. 125–138. Doi: 10.23859/estr-200323.
7. Parmar T.K., Rawtani D., Agrawal Y.K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution // *Frontiers in Life Science*. 2016. Vol. 9, № 2. P. 110–118. Doi: 10.1080/21553769.2016.1162753.
8. Кузнецов С.И. Микрофлора озер и её геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970. 440 с.
9. Ермакова Е.П., Гаврилова Е.И. Многолетняя динамика некоторых микробиологических показателей морских вод м. Шесхарис Новороссийской бухты // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2004. № 2 (215). С. 85–88.
10. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный мир, 2013. 432 с.
11. Соколов С.А. О факторах формирования и трансформации качества воды в водохранилищах // Экология и промышленность России. 2014. № 10. С. 56–61.
12. Даценко Ю.С. Методы оценки внутренней биогенной нагрузки водоёмов (обзор) // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2019. № 9. С. 116–124. Doi: 10.17076/lim1049.
13. Миронов О.Г., Миловидова Н.Ю., Щекатурина Т.Л. Биологические аспекты нефтяного загрязнения морской среды. Киев: Наукова думка, 1988. 248 с.
14. Дианова Е.В., Ворошилова А.А. Окисляющие нефть бактерии – показатели интенсивности биологического окисления нефти в природных условиях // Микробиология. 1952. Т. 21, № 4. С. 408–415.
15. ГОСТ 17.1.3.08-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества морских вод. М., 1982.
16. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов: практ. руководство. М.: Лаборатория знаний, 2020. 273 с.
17. Практическое руководство по химическому анализу элементов водных экосистем. Приоритетные токсиканты в воде, донных отложениях, гидробионтах / под ред. Т.О. Барабашина. Ростов н/Д.: Мини Тайп, 2018. 436 с.
18. Практикум по микробиологии / под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 608 с.
19. Руденко Б.А., Федоров К.П., Виноградов Б.А., Белов В.Ф. Газохроматографическое определение содержания углеводородов в морской воде // Журн. аналит. химии. 1981. № 36. С. 1575–1581.
20. Neue Niederlandische Liste // *Altlasten Spektrum* 3/95.

References

1. Sharovarina E.S. *The impact of the North-Crimean Canal on the ecology of the Crimea*. Available from: <http://www.gpntb.ru/win/inter-events/crimea2018/disk/006.pdf> [Accessed 10th February 2023]. (In Russ.).
2. Lyashevskiy V.I., Verdysh M.V. Ameliorative characteristics of irrigated lands of the Crimea. *Nauch. zhurn. Ros. NII problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2018;(3):86-99, doi: 10.31774/2222-1816-2018-3-86-99. (In Russ.).
3. Khitrov N.B., Klimenko O.E., Rogovneva L.V., Dunaieva Ie.A., Popovich V.F. Long-term after-effect of soil irrigation by waters of the North-Crimean Channel in the gardens. *Tavr. vestn. agrarnoy nauki = Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2017;(1):87-98. (In Russ.).
4. Available from: <https://crimea.ria.ru/20221108/skolko-vody-poluchil-krym-posle-otkrytiya-severo-krymskogo-kanala-1125278686.html> [Accessed 10th February 2023]. (In Russ.).
5. Sanitary rules and regulations 2.1.4.2580-10. Drinking water. Hygienic requirements for the quality of water of centralized drinking water supply systems. Quality control. *Bulletin of Normative Acts of the Federal Organs of Executive Power*. 2010;(14). (In Russ.).

6. Lozhkina R.A., Tomilina I.I., Gapeeva M.V. Long-term dynamics of the water quality in the Rybinsk reservoir according to biotesting. *Transformatsiya ekosistem = Ecosystem Transformation*. 2020;3(3):125-138, doi: 10.23859/estr-200323. (In Russ.).
7. Parmar T.K., Rawtani D., Agrawal Y.K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in Life Science*. 2016;9(2):110-118, doi: 10.1080/21553769.2016.1162753.
8. Kuznetsov S.I. *Microflora of lakes and its geochemical activity*. Leningrad: Nauka Publ.; 1970. 440 p. (In Russ.).
9. Ermakova E.P., Gavrilova E.I. Long-term dynamics of some microbiological indicators of sea waters in Cape Sheshkharis of the Novorossiysk Bay. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region*. 2004;(2):85-88. (In Russ.).
10. Nemirovskaya I.A. *Oil in the ocean (pollution and natural flows)*. Moscow: Nauchnyy mir Publ.; 2013. 432 p. (In Russ.).
11. Sokolov S.A. On the factors of formation and transformation of water quality in reservoirs. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2014;(10):56-61. (In Russ.).
12. Datsenko Yu.S. Methods for assessing the internal biogenic load of water bodies (review). *Tr. Karelskogo nauch. tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019;(9):116-124, doi: 10.17076/lim1049. (In Russ.).
13. Mironov O.G., Milovidova N.Yu., Shehekaturina T.L. *Biological aspects of oil pollution of the marine environment*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1988. 248 p. (In Russ.).
14. Dianova E.V., Voroshilova A.A. Oil-oxidizing bacteria – indicators of the intensity of biological oxidation of oil in natural conditions. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 1952;21(4):408-415. (In Russ.).
15. *GOST 17.1.3.08-82. Protection of Nature. Hydrosphere. Rules for monitoring the quality of sea waters*. Moscow, 1982. (In Russ.).
16. Drugov Yu.S., Rodin A.A. *Ecological analyzes during oil spills and oil products: a practical guide*. Moscow: Laboratoriya znaniy Publ.; 2020. 273 p. (In Russ.).
17. Barabashin T.O., ed. *A practical guide to the chemical analysis of elements of aquatic ecosystems. Priority toxicants in water, bottom sediments, hydrobionts*. Rostov-on-Don: Mini Tayp Publ.; 2018. 436 p. (In Russ.).
18. Netrusov A.I., ed. *Workshop on microbiology*. Moscow: Akademiya Publ.; 2005. 608 p. (In Russ.).
19. Rudenko B.A., Fedorov K.P., Vinogradov B.A., Belov V.F. Gas chromatographic determination of hydrocarbons in seawater. *Zhurn. analit. khimii = Journal of Analytical Chemistry*. 1981;(36):1575-1581. (In Russ.).
20. Neue Niederlandische Liste. *Altlasten Spektrum* 3/95.

Информация об авторах

Наталья Юрьевна Мирзоева – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела радиационной и химической биологии.

Ольга Викторовна Соловьёва – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник.

Юлия Валерьевна Дорошенко – кандидат биологических наук, научный сотрудник.

Елена Андреевна Тихонова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник.

Наталья Витальевна Бурдиян – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

Natalia Yu. Mirzoeva - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Head of Radiation and Chemical Biology Department.

Olga V. Soloveva - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher.

Yuliya V. Doroshenko - Candidate of Science (Biology), Researcher.

Elena A. Tikhonova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher.

Nataliya V. Burdiyan - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023; одобрена после рецензирования 09.06.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 01.03.2023; approved after reviewing 09.06.2023; accepted for publication 30.10.2023.

Научная статья

УДК 631.41

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-126-136

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ МИГРАЦИЯ В СИСТЕМЕ ПОЧВА – РАСТЕНИЕ НА ПРИМЕРЕ ПАРКА Н. ОСТРОВСКОГО ГОРОДА РОСТОВА-НА-ДОНУ

*Надежда Владимировна Сальник¹, Виктория Александровна Иволгина²,
Сергей Николаевич Горбов³✉, Денис Андреевич Козырев⁴*

^{1, 2, 3, 4} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹salnik@sfedu.ru

²vickaivolgina@yandex.ru

³sngorbov@sfedu.ru✉

⁴kozyrev@sfedu.ru

Аннотация. Приведены данные исследования миграции тяжелых металлов в почвенном профиле парково-рекреационной зоны г. Ростова-на-Дону на примере парка Н. Островского. Рассмотрены вопросы транслокации тяжелых металлов в ассимилирующие органы – листья *Acer platanoides* L. На основании рассчитанных коэффициентов концентрирования сделаны выводы о загрязнении поверхностного слоя естественных почв города цинком, кобальтом и свинцом. Значения коэффициентов, характеризующих потенциальное поглощение химических элементов и их актуальное поглощение, свидетельствуют о ремедиативных свойствах, выполняемых *Acer platanoides* L., а также об антропогенной природе загрязнения поверхностного слоя почвы.

Ключевые слова: чернозем миграционно-сегрегационный, тяжелые металлы, ремедиация почв

Для цитирования: Сальник Н.В., Иволгина В.А., Горбов С.Н., Козырев Д.А. Распределение тяжелых металлов и их миграция в системе почва – растение на примере парка Н. Островского города Ростова-на-Дону // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 126–136.

Благодарности: исследование выполнено на базе Южного федерального университета за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00418, <https://rscf.ru/project/23-27-00418/>.

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

Original article

DISTRIBUTION OF HEAVY METALS AND MIGRATION IN THE SOIL-PLANT SYSTEM ON THE EXAMPLE OF N. OSTROVSKY PARK IN ROSTOV-ON-DON

Nadezhda V. Salnik¹, Victoria A. Ivolgina², Sergei N. Gorbov³✉, Denis A. Kozyrev⁴

^{1, 2, 3, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹salnik@sfedu.ru

²vickaivolgina@yandex.ru

³sngorbov@sfedu.ru✉

⁴kozyrev@sfedu.ru

© Сальник Н.В., Иволгина В.А., Горбов С.Н., Козырев Д.А., 2023

Abstract. The article presents the data of the study of heavy metal migration in the soil profile of the park-recreational zone of Rostov-on-Don on the example of the N. Ostrovsky park. The questions of heavy metals translocation into assimilating organs - leaves of *Acer platanoides* L. On the basis of calculated concentration coefficients conclusions are made about contamination of the surface layer of natural soils of the city with zinc, cobalt and lead. The values of coefficients characterizing the potential uptake of chemical elements and their actual uptake indicate the remediative properties performed by *Acer platanoides* L., as well as the anthropogenic nature of contamination of the surface layer of soil.

Keywords: Calcic chernozem, heavy metals, soil remediation

For citation: Salnik N.V., Ivolgina V.A., Gorbov S.N., Kozyrev D.A. Distribution of Heavy Metals and Migration in the Soil-Plant System on the Example of N. Ostrovsky Park in Rostov-on-Don. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):126-136. (In Russ.).

Acknowledgments: the study was carried out on the basis of the Southern Federal University through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-27-00418, <https://rscf.ru/project/23-27-00418/>.

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

Введение

Многолетний комплексный эколого-геохимический мониторинг состояния почв урболандшафтов является неотъемлемой частью исследований, целью которых служит выявление особенностей распределения и миграции поллютантов и их влияния на биогеоценоз в целом. В условиях антропогенной нагрузки такие исследования позволяют оценить прошлое, настоящее и спрогнозировать будущие изменения и принять необходимые меры по профилактике и предотвращению загрязнения.

Серьезной проблемой является загрязнение почв тяжелыми металлами [1–3]. Изучению закономерностей распределения тяжелых металлов в различных типах почв в условиях минимального антропогенного воздействия и техногенной нагрузки посвящено довольно много работ [4–6]. Однако валовое содержание тяжелых металлов в почвах не является достаточным показателем опасности их загрязнения и биодоступности, которая зависит от содержания органического вещества в почве, гранулометрического состава, активности микроорганизмов, емкости катионного обмена и pH почвенного раствора. Токсическое действие металлов зависит от форм их нахождения в почве, а также от характера закрепления металлов органоминеральной матрицей почв [7].

Ведущая роль в сорбции тяжелых металлов отводится органическому веществу почв и глинистым минералам. Гуминовые вещества могут вступать в реакции комплексообразования с ионами металлов и в зависимости от относительной устойчивости комплексов металла и гумата, а также от кислотности почвенного раствора способны как увеличивать, так и уменьшать адсорбцию металлов на поверхности минералов [8]. В работе некоторыми авторами на основе модельного эксперимента установлены закономерности сорбции цинка и меди гидроморфными почвами Юга России, данное исследование позволило подтвердить иммобилизацию металлов на поверхности монтмориллонита и кальцита и возможность их использования в качестве эффективного материала для удержания цинка и меди в почвах [9].

Растения являются природным индикатором состояния окружающей среды, поскольку для роста и развития им необходимо определенное количество макро- и микроэлементов. И если соли металлов, относящиеся в массе своей к микроэлементам, способны переходить в почвенный раствор в ионной форме, то их последующая горизонтальная и вертикальная миграция в почвенном профиле делает их легкодоступными для осмотического поглощения корневыми системами растений и вовлечения их в биогеохимический круговорот. Чрезмерное накопление металлов в почве может вызывать токсические эффекты, отрицательно влияя на процессы фотосинтеза, рост растений и ферментативную активность, особенно это касается безбарьерных организмов [10]. Транспорт тяжелых металлов в системе почва – растение представляет собой сложный процесс, зависящий не только от характеристик почвы, но и от вида, возраста растения и их принадлежности к той или иной экологической группе [11]. Поскольку растения способны поглощать и

концентрировать металлы в ассимилирующих органах, их используют не только в качестве био-геохимических индикаторов, но и в процессах фитоэкстракции и фитостабилизации с целью ремедиации почв, подвергшихся техногенному загрязнению [12–15].

Ростов-на-Дону является крупным промышленным городом, располагающимся на юго-западе России с населением более миллиона человек. В силу сосредоточения в городской черте большого количества промышленных предприятий и логистических хабов, одной из экологических проблем города является загрязнение почв различными поллютантами органической и неорганической природы. Доминирующими загрязнителями выступают тяжелые металлы, специфика поступления, аккумуляции и миграции которых в почвах довольно хорошо изучены и описаны в многочисленных статьях [16–20]. Последние комплексные геоэкологические исследования проводились в период 2013–2017 гг. в девяти парках города [21], на участках, определенных под строительство и реконструкцию промышленных и жилищных объектов [22], и придорожных ландшафтах [23–25].

В этой связи мониторинг территорий, подвергшихся загрязнению, представляет большую значимость с точки зрения как научного интереса, так и экологического контроля, связанного с выбором ремедиативных объектов.

Целью нашего исследования являлось изучение динамики загрязнения тяжелыми металлами естественных почв старой части парка Н. Островского, испытывавшего аномальные выбросы тяжелых металлов в период функционирования лакокрасочного завода «Эмпилс-цинк». На территории парка произрастают различные в таксономическом отношении древесные растения, среди которых доминирующим видом является *Robinia pseudoacacia*. Однако транслокацию металлов в системе почва – растение исследовали в древесных насаждениях *Acer platanoides* L. Этот выбор решения основан на известной ремедиативной функции, выполняемой породой *Acer*, кроме того, корневая система *Acer platanoides* L. является поверхностной, что позволяет оценить непосредственное влияние поллютантов на растение.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись почвы и лиственный опад с деревьев *Acer platanoides* L., произрастающих на территории парка Н. Островского г. Ростова-на-Дону (рис. 1), парк расположен на плакоре водораздельной части между реками Дон и Темерник.

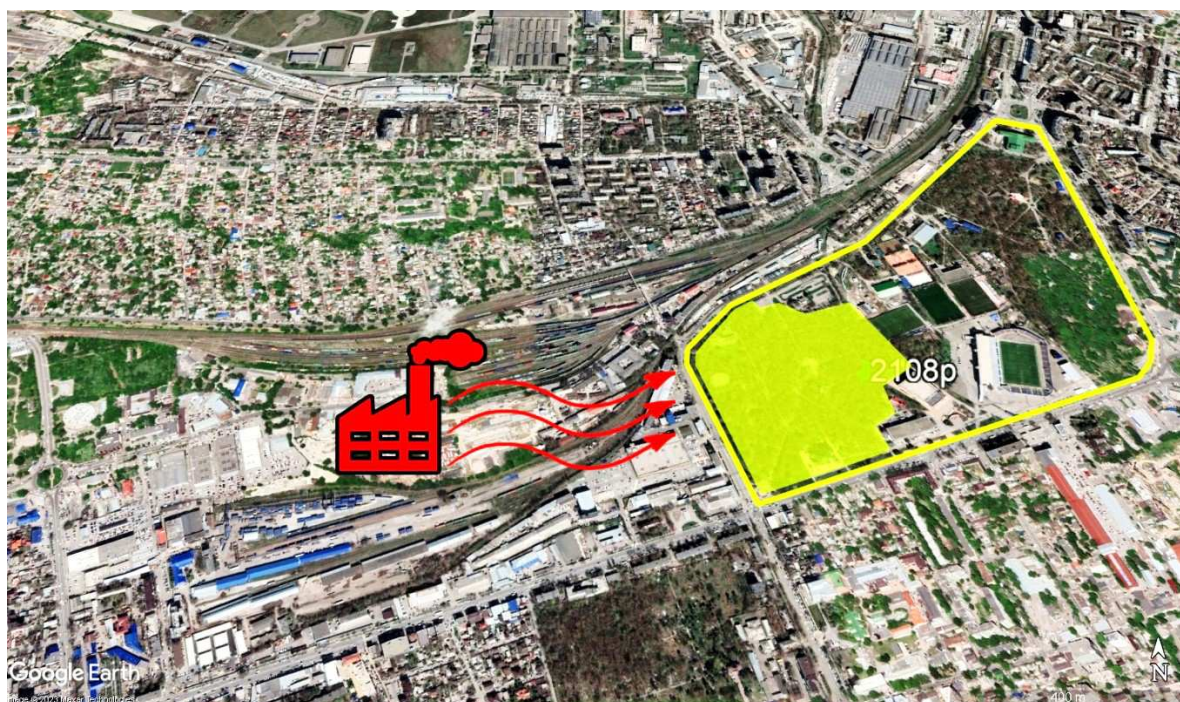


Рис. 1. Карта расположения парка Н. Островского и завода «Эмпилс-цинк» в начале 90-х гг. XX в.
/ Fig. 1. Location map of the N. Ostrovsky Park of the Empils-Zinc plant in the 90s of 20th century



Рис. 2. Почвенный разрез чернозема миграционно-сегрегационного (Calcic chernozem) на территории парка Н. Островского / Fig. 2. Soil profile of Calcic chernozem in N. Ostrovsky Park

ром отверстий 0,25 мм (специальная пробоподготовка) [27]. Определение валового содержания тяжелых металлов проводилось рентгенофлуоресцентным методом на приборе Spectroscan МАКС-GVM. Экстракцию подвижных форм металлов проводили с использованием ацетатно-аммонийного буфера (рН=4,8), соотношение почва/экстрагент 1:10, с последующим определением концентрации металлов методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии на приборе МГА-915.

Математическую обработку данных осуществляли с помощью общепринятых методов вариационной статистики с использованием пакета программ Microsoft Excel. Математическая обработка данных производилась в программе Statistica 13.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 сгруппированы результаты определения валового содержания микроэлементов на территории парка Н. Островского в черноземах миграционно-сегрегационных.

Полученные результаты валового содержания элементов в почве, на первый взгляд, свидетельствуют лишь о незначительном превышении концентрации цинка относительно ОДК в поверхностном гумусово-аккумулятивном горизонте. Тем не менее для остальных изученных элементов зафиксировано превышение значений региональных норм, характерных для пахотных черноземов юга Ростовской области в доиндустриальный период [28]. Однако нельзя исключать как генетические особенности изученных почв, связанные со спецификой гранулометрического состава и уровня гумусированности, так и специфику геохимических потоков на мезоуровне, связанную с пестротой почвообразующих пород в г. Ростове-на-Дону [25].

Для оценки загрязненности поверхностного гумусово-аккумулятивного горизонта (AU_{tz}) рассчитывались коэффициенты концентрации химического элемента К_с как отношения фактического содержания элемента к фоновому аналогу. Полученные значения К_с свидетельствуют о загрязнении поверхностного слоя почвы цинком (К_с=3,2), свинцом (К_с=1,8) и кобальтом (К_с=1,7). Для остальных элементов наблюдается слабое загрязнение поверхностного слоя почвы (К_с(Cr)=К_с(Ni)=К_с(As)=1,2; К_с(Cu)=0,8).

Исследуемые почвы, согласно [26], идентифицированы как черноземы миграционно-сегрегационные, согласно мировой реферативной базе почвенных ресурсов WRB (WRB 2022) – как Calcic chernozem. Отбор поверхностных проб почвы и растительного опада производился на 10 площадках мониторинга, на одной из которых был заложен полнопрофильный почвенный разрез с целью уточнения основных морфологических характеристик почвы парка в целом (рис. 2). Для определения валового содержания микроэлементов образцы почвы отбирались из всех генетических горизонтов почвенного профиля.

Интенсивность накопления тяжелых металлов в листьях *Acer platanoides* L. проводили осенью 2022 г., в период листопада. Пробы растительного материала были высушены до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, затем озолялись сухим методом при температуре 500 °С, после чего проводилась экстракция тяжелых металлов раствором соляной кислоты (20 %). Концентрацию металлов в полученных растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии на приборе МГА-915.

Почвенные образцы, доведенные до воздушно-сухого состояния и перетертые в агатовой ступке, просеивались через сито с диамет-

Таблица 1 / Table 1

Микроэлементный состав чернозема миграционно-сегрегационного, мг/кг, под *Acer platanoides* L., г. Ростов-на-Дону, парк Н. Островского (почвенный профиль) / Microelement composition of Calcic chernozem, mg/kg, by *Acer platanoides* L., Rostov-on-Don, N. Ostrovsky Park (soil profile)

Горизонт		Валовое содержание элементов, мг/кг						
		Cr	Ni	As	Co	Zn	Pb	Cu
AU rz	Ad 0-10	120,92	52,64	10,12	13,92	243,17	45,25	43,85
AU 1	A1 10-40	117,87	56,59	10,21	16,93	87,07	20,80	38,59
AU 2	A2 40-65	129,33	55,69	7,95	16,05	75,73	23,62	40,70
AU hi	B1 65-85	118,05	58,38	8,14	15,93	72,67	26,84	39,73
BCA lc	B2 85-100	109,56	54,83	9,41	17,23	70,65	22,82	41,03
BCA nc	BC 100-130	113,27	49,97	7,33	21,25	71,21	28,29	49,00
C ca	Cca 130-145	107,32	47,52	10,94	20,98	69,62	21,63	51,46
Фон, мг/кг [28]		100	45	8	8	75	25	55
ОДК почв		–	80	10	–	220	130	132
Коэффициент концентрирования металла (Kc)		1,2	1,2	1,2	1,7	3,2	1,8	0,8
Коэффициенты выноса /накопления металла (EA)		1,1	1,1	0,9	0,7	3,5	2,1	0,8

С целью дифференциации валовых форм тяжелых металлов по профилю и выявления закономерности аккумуляции и миграции элементов были рассчитаны коэффициенты выноса/накопления (EA – eluviation/accumulation) как отношение концентрации металла в исследуемом горизонте к его содержанию в почвообразующей породе. Значения коэффициентов EA, превышающих единицу, указывают на накопление элемента в поверхностном слое, значения ниже единицы свидетельствуют о выносе элемента в нижележащие слои почвы [16].

Вниз по профилю наблюдаются различные тенденции в изменении содержания металлов. Так, накопление свинца в поверхностных горизонтах объясняется близостью к крупным трассам. Профильное распределение никеля и меди (табл. 1) показывает постепенное снижение содержания элементов с глубиной в узком диапазоне величин. Существенной биогеохимической миграции данных элементов в профиле миграционно-сегрегационных черноземов не зафиксировано.

Распределение цинка в профиле чернозема свидетельствует о его поступлении в городскую почву аэрогенно, поскольку пики концентрации данного элемента приурочены именно к поверхностному 10-сантиметровому слою почвы (гор. AUrz). Начиная с горизонта AU, происходит равномерное убывание данного элемента вплоть до материнской породы Cca. Источником поступления цинка в поверхностный горизонт являлся ранее базировавшийся в непосредственной близости от парка химический завод по производству цинковых белил. В ранних работах авторы уже сталкивались с подобным явлением при изучении микроэлементного состава почв г. Ростова-на-Дону, при этом обогащение верхнего профиля цинком трактовалось сорбцией почвой комплексов гуминовых кислот с цинком [16].

Поверхностный горизонт обогащен валовыми формами свинца по сравнению с нижележащими иллювиальными горизонтами, что также объясняется антропогенным влиянием, а именно выхлопными газами автотранспорта. Рассчитанные значения коэффициентов EA указывают на поверхностное накопление хрома и никеля (EA =1,1), а также цинка (EA =3,5) и свинца (EA =2,1).

По данным исследований, проведенных в период с 1992 по 1998 г., уровень загрязнения цинком составлял порядка 600–1500 мг/кг, а свинцом – 100–200 мг/кг [29]. Анализируя нынешние показатели, можно отметить изменение общей картины загрязнения верхнего горизонта цинком и свинцом на территории парка, за последние 20 лет этот уровень заметно снизился. По-видимому, отсутствие атмосферической нагрузки и перенос частиц почвенной пыли с цинком в другие зоны в значительной мере снизил данные показатели.

Поскольку степень воздействия металлов на окружающую среду определяется формами их нахождения, накопление данных металлов в почве послужило основой для определения их подвижных форм.

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что концентрации подвижных форм свинца и кобальта превышают значения предельно допустимых концентраций, установленных санитарными нормами. Содержание в поверхностном слое почвы мобильной формы цинка при этом ниже ПДК. В связи с этим возникает резонный интерес к оценке способности *Acer platanoides* L. к поглощению и транспорту подвижных форм вышеназванных металлов к ассимилирующим органам – листьям, это позволит достоверно установить интенсивность фитоэкстракции. Для этой цели нами был проведен анализ валового содержания металлов листового опада. В табл. 3 представлены данные по значениям валовых форм тяжелых металлов в опаде, коэффициенты биологического поглощения (Кб) и биогеохимической подвижности (Вх).

Таблица 2 / Table 2

ПДК почв, фоновые значения металлов в почве, значения подвижных форм металлов, мг/кг, доля ПДК / MAC of soils, background values of metals in soil, values of mobile forms of metals, mg/kg, fraction of MAC

Элемент	ПДК почв, мг/кг	Фон, мг/кг [28]	Подвижные формы, мг/кг	Доля ПДК
Zn	23,0	75,0	0,69±0,14	0,03±0,01
Co	5,0	8,0	12,90±2,71	2,58±0,50
Pb	6,0	25,0	40,10±8,41	6,68±1,39

Таблица 3 / Table 3

Содержание химических элементов в листьях *Acer platanoides* L., г. Ростов-на-Дону, парк Н. Островского, коэффициенты биологического поглощения (Кб), коэффициенты биогеохимической подвижности (Вх) / Content of chemical elements in leaves of *Acer platanoides* L., Rostov-on-Don, N. Ostrovsky Park, biological uptake coefficients (Kb), biogeochemical mobility coefficients (Vx)

Точка отбора	Zn	Кб	Вх	Co	Кб	Вх	Pb	Кб	Вх
1	2,50	<<1	4,71	0,001	<<1	<<1	0,79	<<1	<<1
2	1,10		7,33	0,004			0,82		
3	1,68		2,00	0,002			0,71		
4	1,03		1,60	0,005			0,78		
5	2,38		3,20	0,007			0,64		
6	1,84		2,40	0,003			0,92		
7	2,42		3,20	0,002			0,91		
8	3,03		3,50	0,001			0,66		
9	2,04		5,50	0,002			0,74		
10	1,62		2,00	0,003			0,78		
ПДК почв, мг/кг	23,0			5,0			6,0		
Фон, мг/кг [28]	75,0			8,0			25,0		

Как правило, к концу вегетации вследствие безбарьерного характера поглощения биофильных элементов наблюдается их повышенное содержание в гумидокатных растениях, к которым может быть отнесен и *Acer platanoides* L., подвергшийся инвазии в регион карбонатных почв. Однако в листовом опаде обследованных деревьев содержание цинка, кобальта и свинца ниже нормы, что, возможно, связано с барьерной функцией, проявляемой древесными формами растения, с другой стороны, закрепленная наследственностью гумидокатность может не всегда проявляться в аридных ландшафтах.

С целью подтверждения представленных доводов были выполнены расчеты коэффициентов, характеризующих интенсивность поглощения химических элементов. Одним из показателей

барьерных свойств растения служит Кб, который рассчитывается как отношение содержания химического элемента в надземной части растения к общему содержанию элемента в почве. Полученные значения Кб для цинка, кобальта и свинца демонстрируют, что данные элементы лишь захватываются растением, но не накапливаются. Низкое содержание свинца и кобальта в растениях обусловлено наличием барьерных механизмов по отношению к данным элементам.

Исходя из рядов биологического поглощения химических элементов [30], цинк относится к элементам сильного биологического накопления, а свинец и кобальт – слабого и очень слабого биологического захвата. Несмотря на выявленное загрязнение поверхностного горизонта почвы (гор. АUтз), рассчитанные значения Кб позволяют исключить фактор влияния этого загрязнения на суммарное накопление металлов (Zn, Co, Pb) в листьях. Рассматривая корнеобитаемый слой в целом, видно, что наличие карбонатного барьера препятствует дальнейшему проникновению цинка в более глубокие слои почвы, тем самым переводит их в недоступные для гумидокатных растений состояния.

На основании проведенной диагностики нативных почв парка была составлена карта загрязнений поверхностного слоя почвы цинком (рис. 3).

Поскольку факторов, оказывающих влияние на накопление металлов в растениях, достаточно много, достоверно приблизиться к истине представляется сложной задачей. Так, например, непостоянство ритма прироста биомассы и физиологическая потребность в конкретном элементе корреляционно зависимы и вызваны сезонными изменениями.

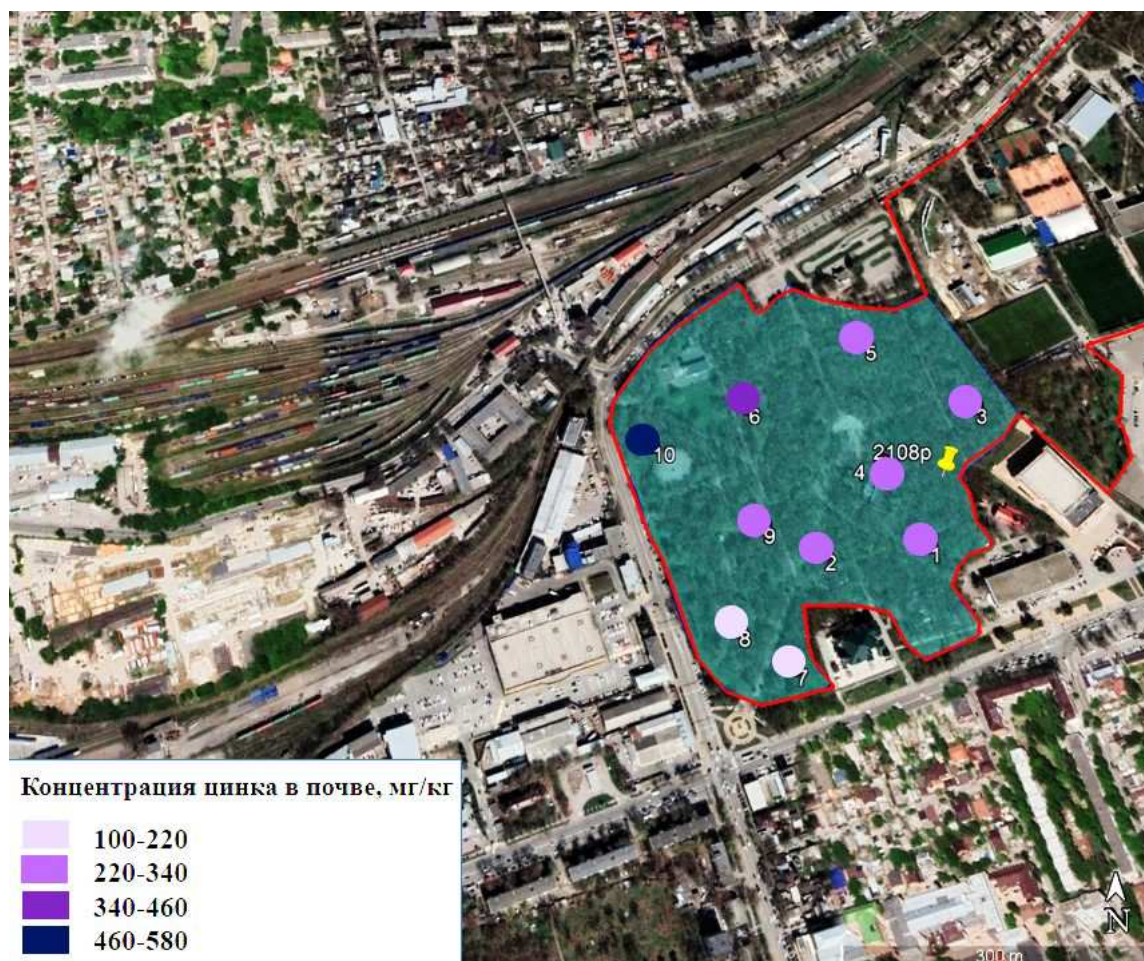


Рис. 3. Карта загрязнения почвы парка Н. Островского цинком
/ Fig. 3. Map of contamination N. Ostrovsky Park soil by zinc

При всей важности коэффициента биологического поглощения следует отметить, что он отражает лишь потенциальную доступность элементов растению. Объективную картину актуальной доступности элементов демонстрирует V_x [31], показывающий отношение содержания металла

в золе растения к содержанию металла в подвижной форме в почве. Значения V_x (табл. 3) указывают на то, что цинк в поверхностном слое почвы находится в доступной к усвоению растением форме ($V_x > 1$), тем не менее вследствие сезонных изменений концентрация его в листьях минимальна. А вот кобальт, чья исключительная польза для растения заключается в его влиянии на фотосинтетический аппарат и участии в образовании металлоферментов, вероятней всего, концентрируется в корневой системе *Acer platanoides* L. за счет установления физиологического барьера либо благодаря аттрагирующей способности листьев к перемещению данного элемента в другие части растения. Относительно свинца *Acer platanoides* L. проявляет барьерные функции, поскольку свинец является токсическим элементом для растений.

Таким образом, можно сказать, что, несмотря на высокое содержание цинка, кобальта и свинца и явный аспект загрязнения данными металлами поверхностного слоя почвы, корневая система клена остролистного играет роль барьерного механизма в отношении тяжелых металлов.

Заключение

С точки зрения санитарно-гигиенических критериев поверхностный гумусово-аккумулятивный горизонт естественных почв парка им. Н. Островского характеризуется повышенными концентрациями цинка, кобальта и свинца, что обусловлено аэральными выпадениями представленных металлов из стационарных источников и средств передвижения. Однако существенной биогеохимической миграции элементов в нижележащие иллювиальные горизонты почвы не происходит, даже на фоне сезонного изменения внутрипочвенных токов влаги.

Доступные для растений мобильные формы свинца и кобальта присутствуют в почве в токсической концентрации, при этом доля подвижного цинка в сравнении с валовыми формами, зафиксированными в корнеобитаемой толще, относительно невелика. Несмотря на присутствие в почве доступных форм тяжелых металлов, *Acer platanoides* L. устанавливает физиологический барьер, препятствующий их транслокации в листья, последующему выносу с листовым опадом и загрязнению поверхностного горизонта почвы.

Список источников

1. Gurajala H. K., Cao X., Tang L., Ramesh T.M., Lu M., Yang X. Comparative assessment of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) genotypes for phytoremediation of Cd and Pb contaminated soils // Environmental Pollution. 2019. Vol. 254. P. 113085.
2. Shao Y., Yan T., Wang K., Huang S., Yuan W., Qin F.G. Soil heavy metal lead pollution and its stabilization remediation technology // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 122–127.
3. Zheng R., Feng X., Zou W., Wang R., Yang D., Wei W., Chen H. Converting loess into zeolite for heavy metal polluted soil remediation based on “soil for soil-remediation” strategy // J. of Hazardous Materials. 2021. Vol. 412. P. 125–199.
4. Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Okolelova A.A., Salnik N.V., Tagiverdiev S.S., Plachov G.A. Particle-size distribution and heavy metals accumulation in soils of Rostov-on-Don // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 368, № 1. P. 012009.
5. Минкина Т.М., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А., Назаренко О.Г., Максимов А.Ю., Замулина И.В., Бурачевская М.В., Сушкова С.Н. Аккумуляция тяжелых металлов разнотравной степной растительностью по данным многолетнего мониторинга // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24, № 3 (76). С. 48–61.
6. Pinsky D.L., Minkina T.M. Regularities of Cu, Pb and Zn adsorption by chernozems of the South of Russia // Eurasian J. of Soil Science. 2013. Vol. 2, № 1. P. 59–68.
7. Водяницкий Ю.Н. Изучение тяжелых металлов в почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2005. 109 с.
8. Kloster N., Avena M. Interaction of humic acids with soil minerals: adsorption and surface aggregation induced by Ca^{2+} // Environmental Chemistry. 2015. Vol. 12, № 6. P. 731–738.
9. Bauer T.V., Pinski D.L., Minkina T.M., Shuvaeva V.A., Soldatov A.V., Mandzhieva S.S., Tsitsuashvili V.S., Nevidomskaya D.G., Semenov I.N. Application of XAFS and XRD methods for describing the copper and zinc adsorption characteristics in hydromorphic soils // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44, № 2. P. 335–347.
10. John R., Ahmad P., Gadgil K., Sharma S. Effect of cadmium and lead on growth, biochemical parameters and uptake in *Lemna polyrrhiza* L. // Plant Soil and Environment. 2008. Vol. 54, № 6. P. 262.

11. Корельская Т.А., Попова Л.Ф. Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове селитебного ландшафта города Архангельска // Арктика и Север. 2012. № 7. С. 136–152.
12. Mleczek M., Rutkowski P., Rissmann I., Kaczmarek Z., Golinski P., Szentner K., Stachowiak A. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis* // Biomass and Bioenergy. 2010. Vol. 34, № 9. P. 1410–1418.
13. Pouresmaeli M., Ataei M., Forouzandeh P., Azizollahi P., Mahmoudifard M. Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil // J. of Environmental Chemical Engineering. 2022. Vol. 10, iss. 5. P. 108482.
14. Baibekov R.F., Belopukhov S.L., Savich V.I., Razin A.S. New methods of cleaning soil from heavy metals // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 843, № 1. P. 012048.
15. Ciaramella B.R., Corinzia S.A., Cosentino S.L., Testa G. Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils Using Safflower // Agronomy. 2022. Vol. 12, № 10. P. 2302.
16. Горбов С.Н., Безуглова О.С., Алексикова А.С., Тагивердиев С.С., Дубинина М.Н., Шерстнев А.К. Содержание и распределение тяжелых металлов и мышьяка в почвах Ростова-на-Дону // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 4.
17. Дубинина М.Н., Горбов С.Н., Безуглова О.С., Шерстнев А.К. Содержание и профильное распределение валовых форм тяжелых металлов в почвах урбанизированных территорий Юга России // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2016. Т. 18, № 2-2. С. 349–354.
18. Соборникова И.Г., Кизильштейн Л.Я. Медь, цинк, свинец в почвах и растениях полыни г. Ростова-на-Дону и его окрестностей // Изв. СКНЦ ВШ. 1990. № 4. С. 3–8.
19. Плахов Г.А., Горбов С.Н., Безуглова О.С., Тагивердиев С.С., Козырев Д.А. Оценка загрязнения почв Ростовской агломерации подвижными формами тяжелых металлов // Охрана природной среды и эколого-биологическое образование : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Елабуга: Леонтьев В.В., 2015. С. 52–56.
20. Гудзенко Е.О., Безуглова О.С. Биомониторинг загрязнения химическими элементами рекреационных территорий г. Ростова-на-Дону // Политем. сетевой электр. науч. журн. Кубанского гос. аграр. ун-та. 2016. № 123. С. 480–490.
21. Шишкина Д.Ю. Тяжелые металлы в почвах парков Ростова-на-Дону // Экология родного края: проблемы и пути решения: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Киров: Радуга-ПРЕСС, 2016. Т. 2. С. 67–70.
22. Шишкина Д.Ю. Тяжелые металлы в почвах Ростова-на-Дону. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во Южного фед. ун-та, 2017. 98 с.
23. Ильина А.В., Шишкина Д.Ю. Эколого-геохимические исследования в балке Рябины (Ростов-на-Дону) // Проблемы социально-экономической географии и природопользования : сб. тр. Всерос. науч. конф. Ростов н/Д.: Изд-во Южного фед. ун-та, 2017. С. 186–190.
24. Малков Р.А., Шишкина Д.Ю. Экологическое состояние урбандиапазона в зоне влияния автотранспорта (на примере ул. Красноармейской г. Ростова-на-Дону) // Актуальные проблемы наук о Земле : сб. тр. II науч. конф. студентов и молодых ученых с междунар. участием. Ростов н/Д.: Изд-во Южного фед. ун-та, 2016. С. 394–396.
25. Горбов С.Н., Безуглова О.С. Тяжелые металлы и радионуклиды в почвах Ростовской агломерации. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во Южного фед. ун-та, 2020. 124 с.
26. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
27. Ариушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв: учеб. пособие. М.: МГУ, 1970. 488 с.
28. Акимцев В.В., Болдырева А.В., Голубев С.Н., Кудрявцев М.Н., Руденская К.В., Садименко П.А., Соборникова И.Г. Содержание микроэлементов в почвах Ростовской области // Микроэлементы и естественная радиоактивность. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1962. С. 37–42.
29. Приваленко В.В., Безуглова О.С. Экологические проблемы антропогенных ландшафтов Ростовской области. Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2003. 290 с.
30. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 341 с.
31. Гаврилова И.П., Касимов Н.С. Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 72 с.

References

1. Gurajala H.K., Cao X., Tang L., Ramesh T.M., Lu M., Yang X. Comparative assessment of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) genotypes for phytoremediation of Cd and Pb contaminated soils. *Environmental Pollution*. 2019;254:113085.
2. Shao Y., Yan T., Wang K., Huang S., Yuan W., Qin F.G. Soil heavy metal lead pollution and its stabilization remediation technology. *Energy Reports*. 2020;6:122-127.

3. Zheng R., Feng X., Zou W., Wang R., Yang D., Wei W., Chen H. Converting loess into zeolite for heavy metal polluted soil remediation based on “soil for soil-remediation” strategy. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;412:125-199.
4. Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Okolelova A.A., Salnik N.V., Tagiverdiev S.S., Plachov G.A. Particle-size distribution and heavy metals accumulation in soils of Rostov-on-Don. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;368(1):012009.
5. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Nazarenko O.G., Maximov A. Yu., Zamulina I.V., Bura-chevskaya M.V., Sushkova S.N. Accumulation of heavy metals by diverse steppe vegetation based on long-term monitoring data. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2018;24(3):48-61. (In Russ.).
6. Pinsky D.L., Minkina T.M. Regularities of Cu, Pb and Zn adsorption by chernozems of the South of Russia. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2013;2(1):59-68.
7. Vodyanitskiy Yu.N. *Study of heavy metals in soils*. Moscow: Dokuchaev Soil Institute Press; 2005. 109 p. (In Russ.).
8. Kloster N., Avena M. Interaction of humic acids with soil minerals: adsorption and surface aggregation induced by Ca²⁺. *Environmental Chemistry*. 2015;12(6):731-738.
9. Bauer T.V., Pinski D.L., Minkina T.M., Shuvaeva V.A., Soldatov A.V., Mandzhieva S.S., Tsitsuashvili V.S., Nevidomskaya D.G., Semenov I.N. Application of XAFS and XRD methods for describing the copper and zinc adsorption characteristics in hydromorphic soils. *Environmental Geochemistry and Health*. 2022;44(2):335-347.
10. John R., Ahmad P., Gadgil K., Sharma S. Effect of cadmium and lead on growth, biochemical parameters and uptake in *Lemna polyrrhiza* L. *Plant Soil and Environment*. 2008;54(6):262.
11. Korelskaya T.A., Popova L.F. Heavy metals in the soil-plant cover of the settlement landscape of Arkhangel'sk city. *Arktika i Sever = Arctic and North*. 2012;(7):136-152. (In Russ.).
12. Mleczeck M., Rutkowski P., Rissmann I., Kaczmarek Z., Golinski P., Szentner K., Stachowiak A. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*. 2010;34(9):1410-1418.
13. Poursamaieli M., Ataei M., Forouzandeh P., Azizollahi P., Mahmoudifard M. Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(5):108482.
14. Baibekov R.F., Belopukhov S.L., Savich V.I., Razin, A.S. New methods of cleaning soil from heavy metals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;843(1):012048.
15. Ciaramella B.R., Corinzia S.A., Cosentino S.L., Testa G. Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils Using Safflower. *Agronomy*. 2022;12(10):2302.
16. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Aleksikova A.S., Tagiverdiev S.S., Dubinina M.N., Sherstnev A.K. Content and distribution of heavy metals and arsenic in the soils of Rostov-on-Don. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2015;(4). (In Russ.).
17. Dubinina M.N., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Sherstnev A.K. Content and profile distribution of gross forms of heavy metals in the soils of urbanized areas of the South of Russia. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(2-2):349-354. (In Russ.).
18. Sobornikova I.G., Kizilshteyn L.Ya. Copper, zinc, lead in soils and plants of wormwood in Rostov-on-Don and its surroundings. *Izv. SKNTs VSh = Bulletin of the North Caucasus Scientific Center of Higher Education*. 1990;(4):3-8. (In Russ.).
19. Plakhov G.A., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Tagiverdiev S.S., Kozyrev D.A. Assessment of soil pollution in the Rostov agglomeration by mobile forms of heavy metals. *Environmental protection and ecological and biological education*. Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference. Yelabuga: Leontiev V.V. Publ.; 2015:52-56. (In Russ.).
20. Gudzenko E.O., Bezuglova O.S. Biomonitoring of chemical element pollution of recreational areas in Rostov-on-Don. *Politem. setevoy elektr. nauch. zhurn. Kubanskogo gos. agrar. un-ta = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2016;(123):480-490. (In Russ.).
21. Shishkina D.Yu. Heavy metals in soils of Rostov-on-Don parks. *Ecology of the Native Land: Problems and Solutions*. Collection of materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference. Kirov: Raduga-PRESS Publ.; 2016;2:67-70. (In Russ.).
22. Shishkina D.Yu. *Heavy metals in Rostov-on-Don soils*. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press; 2017. 98 p. (In Russ.).
23. Ilina A.V., Shishkina D.Yu. Eco-geochemical research in the Ryabinin ravine (Rostov-on-Don). *Problems of socio-economic geography and nature management*. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2017:186-190. (In Russ.).
24. Malkov R.A., Shishkina D.Yu. Ecological condition of urban landscapes in the influence zone of transport (on the example of Krasnoarmeyskaya Street, Rostov-on-Don). *Current problems of Earth sciences: Collection of*

II Scientific Conference of students and young scientists with international participation. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2016:394-396. (In Russ.).

25. Gorbov S.N., Bezuglova O.S. *Heavy metals and radionuclides in the soils of the Rostov agglomeration*. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press; 2020. 124 p. (In Russ.).

26. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnostics of Russian soils*. Smolensk: Oykumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).

27. Arinushkina E.V. *Guide to soil chemical analysis: textbook*. Moscow: Moscow State University Press; 1970. 488 p. (In Russ.).

28. Akimtsev V.V., Boldyreva A.V., Golubev S.N., Kudryavtsev M.N., Rudenskaya K.V., Sadimenko P.A., Sobdornikova I.G. *Microelement content in the soils of the Rostov region. Microelements and natural radioactivity*. Rostov-on-Don: Rostov University Press; 1962:37-42. (In Russ.).

29. Privalenko V.V., Bezuglova O.S. *Environmental problems of anthropogenic landscapes of the Rostov region*. Rostov-on-Don: North Caucasus Scientific Center of Higher Education Press; 2003. 290 p. (In Russ.).

30. Perelman A.I. *Landscape geochemistry*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1975. 341 p. (In Russ.).

31. Gavrilova I.P., Kasimov N.S. *Practical geochemistry workshop*. Moscow: Moscow State University Press; 1989. 72 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Н.В. Сальник – аспирант, младший научный сотрудник, научно-испытательная лаборатория «Биогеохимия».

В.А. Иволгина – научный сотрудник, научно-испытательная лаборатория «Биогеохимия».

С.Н. Горбов – доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники, заведующий научно-испытательной лабораторией «Биогеохимия».

Д.А. Козырев – младший научный сотрудник, научно-испытательная лаборатория «Биогеохимия».

Information about the authors

N.V. Salnik - Postgraduate Student, Junior Researcher, Scientific Testing Laboratory "Biogeochemistry".

V.A. Ivolgina - Researcher, Scientific Testing Laboratory "Biogeochemistry".

S.N. Gorbov - Doctor of Science (Biology), Professor of the Department of Botany, Head of the Biogeochemistry Research Laboratory "Biogeochemistry".

D.A. Kozyrev - Junior Researcher, Scientific Testing Laboratory "Biogeochemistry".

*Статья поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 02.07.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 06.06.2023; approved after reviewing 02.07.2023; accepted for publication 30.10.2023.*

Научная статья
УДК 551.5
doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-137-148

ВЛИЯНИЕ ОПАСНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ

Наталья Александровна Сытник

*Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Республика Крым, Россия
amtek-kerch@mail.ru*

Аннотация. Рассматриваются природно-климатические условия Керченского пролива, Таманского и Керченского полуостровов, через которые проходит транспортный переход, соединивший Республику Крым с материковой частью РФ. В работе отражены основные особенности формирования опасных гидрометеорологических явлений в Керченском проливе. По данным прибрежных и экспедиционных наблюдений, измерений течений на автоматических буйковых станциях, численного моделирования динамики вод в Керченском проливе для разных типов атмосферных воздействий на сетке с высоким пространственным разрешением освещены гидрометеорологические условия формирования ледового и ветроволнового режимов, других опасных гидрологических и метеорологических явлений в проливе.

Выполненные исследования показали, что в прибрежной зоне и в акватории Керченского пролива периодически возникают опасные гидрометеорологические явления, такие как навалы льда на опоры моста, сильный штормовой или ураганный ветер, сильные осадки, туманы, значительно ухудшающие видимость и затрудняющие морские грузоперевозки в проливе, грозы и смерчи.

Данные, представленные в работе, могут являться основой для оценки современного состояния окружающей среды в рамках экологического сопровождения проектов, а также последующего ледового и гидрометеорологического мониторинга в районе Крымского моста.

Ключевые слова: транспортный переход, Керченский пролив, природно-климатические условия, опасные метеорологические явления

Для цитирования: Сытник Н.А. Влияние опасных гидрометеорологических явлений на эксплуатацию транспортного перехода через Керченский пролив // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 137–148.

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

Original article

INFLUENCE OF HAZARDOUS HYDROMETEOROLOGICAL PHENOMENA ON THE OPERATION OF TRANSPORT CROSSING THROUGH THE KERCH STRAIT

Natalya A. Sytnik

*Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
amtek-kerch@mail.ru*

Abstract. The article considers the natural and climatic conditions of the Kerch Strait, the Taman Peninsula and the Kerch Peninsula through which passes the transport crossing that connects the Republic of Crimea with the Russian mainland. The paper reflects the main features of the formation of dangerous hydrometeorological phenomena in the Kerch Strait. Hydrometeorological conditions of formation of ice and wind-wave regimes and other dangerous hydrological and hydrometeorological phenomena in the Kerch Strait are highlighted based on the coastal and expedition observations, measurements of currents at automatic buoy stations, numerical modeling of water dynamics in the Kerch Strait for different types of atmospheric effects on the grid with high spatial resolution.

© Сытник Н.А., 2023

The research shows that in the coastal zone and on the Kerch Strait water area periodically there are dangerous hydrometeorological phenomena, such as ice blockages on the bridge piers, strong storm or hurricane wind, heavy precipitation, fogs, which significantly worsen the visibility and complicate marine cargo transportation in the Strait, thunderstorms and tornados.

The data presented in this work may be the basis for the assessment of the current state of the environment within the environmental support of the projects, as well as the subsequent ice and hydrometeorological monitoring in the area of the Crimean bridge.

Keywords: transport crossing, Kerch Strait, natural and climatic conditions, hazardous meteorological phenomena

For citation: Sytnik N.A. Influence of Hazardous Hydrometeorological Phenomena on the Operation of Transport Crossing Through the Kerch Strait. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):137-148. (In Russ.).

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

Введение

Керченский пролив является важной судоходной магистралью, соединяющей Черное и Азовское моря. В настоящее время через пролив сооружен один из самых сложных гидротехнических объектов в истории России – Крымский мостовой переход, который имеет ключевое значение с точки зрения интеграции Крыма в Российскую Федерацию, развития промышленного и рекреационного потенциала полуострова. Создание транспортного перехода осложнялось непростыми условиями в Керченском проливе: сложным геологическим строением (наличие мощного слоя илистых отложений, грязевого вулканизма, сейсмической активности) и опасными гидрометеорологическими условиями [1, 2].

В литературе и СМИ хорошо освещены вопросы социально-экономической значимости строительства транспортного перехода через Керченский пролив. Значительно меньше публикаций посвящено оценке природно-климатических условий, а в особенности опасным метеорологическим явлениям, которые могут оказать влияние на эксплуатацию транспортного перехода.

Цель исследования – оценить влияние опасных и неблагоприятных гидрометеорологических природных явлений, возникающих в Керченском проливе, на эксплуатацию транспортного перехода.

Материалы и методы исследования

Материалами для данного исследования являлись экологическая проектная документация транспортного перехода [3–5], а также фондовые материалы и статистические данные Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым.

Теоретической базой научной работы явились результаты исследований, представленные в работах [6–12].

Анализ изменчивости экстремальных гидрометеорологических характеристик в прибрежной зоне Керченского пролива проводился с использованием результатов мониторинга и данных береговых наблюдений Севастопольского отделения Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова» (СО ФГБУ «ГОИН») [2].

При проведении исследований был использован комплекс методов, в том числе общенаучных: анализа и синтеза, сравнения, системного анализа и научных абстракций в части анализа и обработки картографической информации.

Результаты исследования и их обсуждение

Район размещения объекта располагается на территории двух субъектов РФ: Краснодарского края и Республики Крым, пересекая Керченский пролив. Длина морского участка от о. Тузла до г. Керчи составляет 5,5 км. Общая длина транспортного перехода – 19 км (рис. 1). Объект представляет собой совмещенный автодорожный и железнодорожный транспортный переход [1].

Основное внимание в работе уделено опасным и неблагоприятным метеорологическим природным явлениям, периодически возникающим в районе Керченского пролива: сильному ветру,

шквалам, осадкам, грозам, смерчам, ухудшению видимости (сильный туман или сильная мгла), а также ледовым условиям как потенциально опасным. Поскольку имеется отрицательный опыт эксплуатации предыдущего мостового перехода, построенного в 1944 г. в северной узости Керченского пролива без учета ледовых условий и разрушенного уже в январе следующего года в результате интенсивного дрейфа ледовых полей из Азовского моря.



Рис. 1. Район размещения транспортного перехода через Керченский пролив / Fig. 1. Location area of the Kerch Strait transport crossing

Керченский пролив является районом с умеренной штормовой деятельностью. Физико-географические особенности Керченского пролива, расположенного в зоне сопряжения суши с двумя морями, создают ряд отличительных свойств в ветровом режиме пролива по сравнению с Азовским морем и северо-восточной частью Черного моря.

Штормовая деятельность в проливе чаще всего связана со штормами, охватывающими Азовское море и северную часть Черного моря. Преобладают северо-восточные, восточные шторма (со скоростью ветра >15 м/с); они, как правило, и наиболее продолжительны [13, 14]. При этом слабые ветры скоростью 1–5 м/с с повторяемостью 13,8 (МГ Опасное) и 10,3 % (МГ Тамань) имеют северное направление, а с повторяемостью 10,4 (МГ Опасное) и 13,2 % (МГ Тамань) – южное направление.

Максимальные скорости ветра в районе Керченского пролива достигали 28–30 м/с (при порывах до 33–34 м/с) [2]. Внутригодовое распределение средних и максимальных среднемесячных величин скоростей ветра в прибрежной зоне Керченского пролива представлено на рис. 2.

Анализ синоптических ситуаций [2] показал, что наиболее часто скорости ветра, достигающие критериев опасных явлений, в Керченском проливе наблюдаются при ветрах В, ВСВ и СВ направлений. Средняя скорость ветра может достигать 24–30 м/с и наблюдается в холодный период года с наибольшей повторяемостью в феврале – 5 случаев.

Однако в Черном и Азовском морях наблюдаются и аномальные гидрометеорологические условия, получившие общее название «Шторм века». Так, главным штормом XIX в. называют Балаклавскую бурю, которая 14–15 ноября 1854 г. у юго-западной части Крыма нанесла огромный ущерб, потопив почти весь англо-французский флот – 34 корабля, стоявших на рейде. Погибло 1500 человек, а убыток составил 60 млн франков. Причиной бури был глубокий средиземноморский циклон, пришедший в центр Черного моря с юго-запада.

Самая сильная, продолжительная и захватившая огромную территорию буря XX в. произошла 28–29 января 1968 г. Циклон стремительно пересек Анатолийское побережье Турции со скоростью 50 км/ч и 28 января пришел на Керченский пролив. Высота волн достигала 30–40 м.

В XXI в., 11 ноября 2007 г., сильнейший шторм привел к крушению нескольких кораблей в Керченском проливе, Азовском и Черном морях. Скорость ветра достигала 32 м/с, а волнение моря – 6–7 баллов. За один день потерпели крушение семь судов, затонули четыре судна, еще шесть сели на мель, получили повреждения два танкера.

По мнению метеорологов, самым сильным за всю историю наблюдений разгулом стихии в Крыму стал шторм 26–27 ноября 2023 г., получивший название «Шторм века» и возникший вследствие балканского циклона. Ураганные ветры до 40 м/с (144 км/ч) и 8–9-балльная волновая активность морей привели к разрушению капитальных построек, пляжной инфраструктуры, подтоплению территорий и гибели людей. Основной удар стихии пришелся на Крым и Краснодарский край. В Керченском проливе скорость ветра достигала 32–34 м/с, а волнение моря – 7 баллов, что привело к столкновению трех судов. Стоит отметить, что на эксплуатацию Крымского моста «Шторм XXI в.» не оказал воздействия.

Ухудшение видимости в районах с интенсивным судоходством, к которым относится Керченский пролив, представляет повышенную опасность для судов. Несмотря на современные средства навигации, риск столкновения судов как друг с другом, так и с опорами транспортного перехода в Керченском проливе, береговой инфраструктурой в условиях ограниченной видимости повышается. Уменьшение горизонтальной видимости может затруднять движение транспорта по Крымскому мосту.

Ограничивают видимость такие метеорологические явления как туман, дымка, осадки, метель, пыльная буря и мгла. К опасным морским гидрометеорологическим явлениям относится сильный туман на море с метеорологической дальностью видимости (МДВ) не более 50 м [15]. В среднем за год дальность видимости на побережье пролива – 11–15 км, достигая максимальных величин (13–17 км) в летний сезон и уменьшаясь до 8–12 км в холодный период года [2]. В любое время года, кроме июля-августа, видимость может уменьшаться до 0–100 м. Такое ограничение видимости в подавляющем большинстве случаев вызвано туманами, реже обусловлено снегом, метелью, сильным дождем или дымкой. В Керчи среднемноголетнее количество дней в году с туманом составляет 33, мглой – 1, дождем – 111, снегом – 30, метелью – 5, пыльными бурями – 0,5. Количество дней с дымкой – 137 [2].

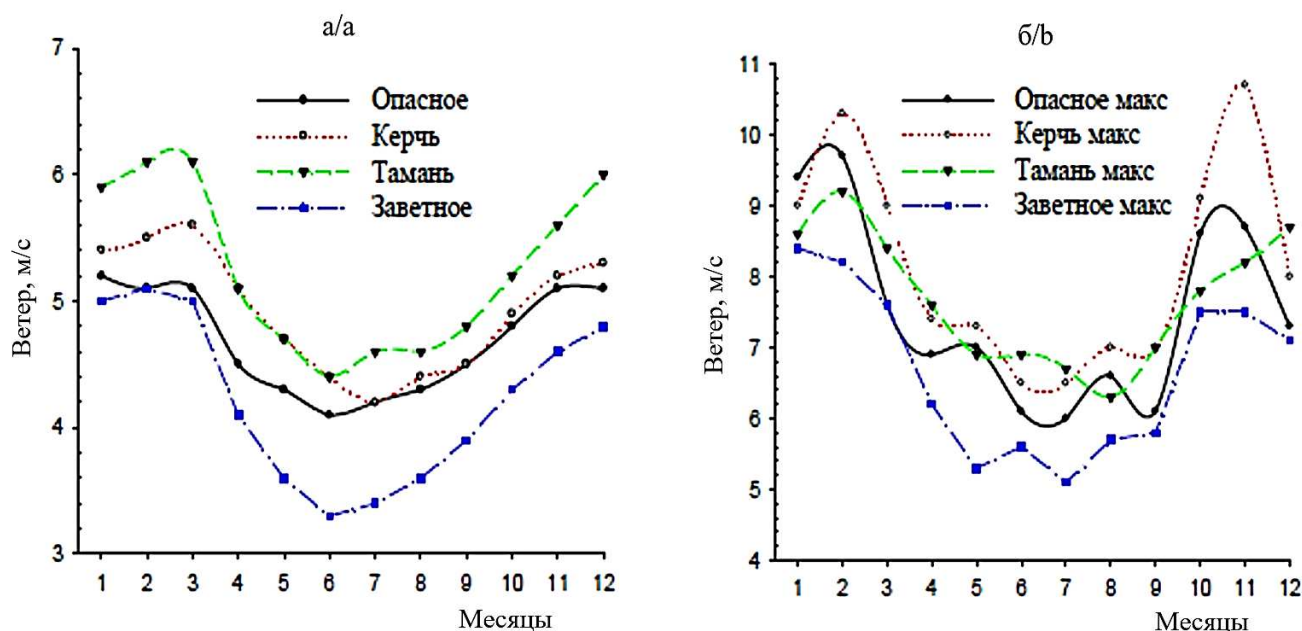


Рис. 2. Внутригодовое распределение средних (а) и максимальных (б) среднемесячных величин скоростей ветра в прибрежной зоне Керченского пролива / Fig. 2. Intra-annual distribution of mean (a) and maximum (b) mean monthly wind speeds in the coastal zone of the Kerch Strait

Зимой, в начале весны и в конце осени в районе Керченского пролива преобладают адвективные туманы, а в остальное время года – радиационные. Летом чаще всего наблюдаются радиационные и фронтальные туманы. Фронтальные туманы возможны в течение всего года, но чаще всего отмечаются зимой и весной. В основном они связаны с прохождением холодных фронтов над Керченским проливом и, как правило, сопровождаются сильным ветром и выпадением осадков.

Адвективные туманы обычно охватывают весь пролив и в большинстве случаев связаны с адвекцией тепла. Такие туманы устойчивы во времени, особенно зимой, когда могут удерживаться до 13 сут подряд (весной и осенью – до 7–8 сут). Туманы, связанные с адвекцией холода, как правило, кратковременны, никогда не продолжаются более 3 сут, независимо от сезона [2]. Радиационные туманы обычно отмечаются на берегу, непродолжительны, наблюдаются в основном ночью и утром и с восходом солнца рассеиваются. Лишь в отдельных случаях зимой, весной и осенью они могут удерживаться до полудня.

Наибольшее среднее количество дней с туманом в Керченском проливе наблюдается в холодный период года – с октября по апрель, достигая максимальных значений в феврале и марте в северной части пролива (по данным МГ Опасное – около 5 дней). С июня по сентябрь на всех станциях количество дней с туманом минимально, а на некоторых в отдельные летние месяцы туман вообще не наблюдается (табл. 1, 2) [2].

Продолжительность туманов обычно не превышает 6 ч и составляет в среднем 4,3 ч. Максимальная длительность туманов (табл. 2) в ноябре – апреле может достигать 48 ч в Керчи (февраль 1971 г.) и 60 ч в Тамани (декабрь 2006 г.).

Анализ синоптических ситуаций, приводящих к формированию сильных туманов в акватории пролива, показывает, что большинство из них возникает при прохождении или стационаровании фронтальных разделов над районами Азовского моря и Керченского пролива в холодный и переходный период года. При этом по периферии антициклонов, располагающихся северо-восточнее, восточнее или южнее акватории Азовского моря, выносятся теплый и влажный воздух, вызывая формирование сильных адвективных туманов. Над районами Черного моря в это время располагается малоградиентное барическое поле, или ложбина с запада, вытянутая на восток Черного моря. Такие синоптические ситуации приведены на картах за 10.04.2008 г., 27.01.2009 г., 12.01.2011 г., 08.02.2011 г., 13.03.2011 г., 17.05.2011 г. (рис. 3) [2].

При прохождении и стационаровании фронтов, связанных с циклонами и ложбинами, проходящими севернее пролива, также могут формироваться сильные туманы. Похожая ситуация наблюдалась 02.03.2006 г., 23.02.2016 г. (сильная адвекция тепла с юго-запада), 16.01.2017 г. (малоподвижный циклон с фронтальными разделами с центром над Азовским морем), 04.11.2017 г. (ось узкой ложбины, ориентированной с севера ЕЧР на Крым).

Сильные туманы формируются летом исключительно редко. Характерный случай отмечался 3 августа 2004 г., когда сильный туман сформировался в акватории Керченского пролива вблизи центра циклона. Туман с видимостью менее 50 м на Таманском полуострове наблюдался 03.08.2018 г. при стационаровании циклона над востоком Черного моря и обширного антициклона на северо-западе [2].

В акватории Керченского пролива частота гроз в течение года различна. Наиболее часто грозы наблюдаются в летний период. По данным наблюдений в Керчи (1969–2017 гг.), максимальное среднемесячное количество дней с грозами (4) отмечается в летние месяцы. В среднем за год в Керчи грозы наблюдаются 17,6 дня [2].

Одним из опасных природных явлений является смерч – сильный маломасштабный атмосферный вихрь в виде столба или воронки, направленный от облака к подстилающей поверхности [16].

По данным А.И. Снитковского, «смерчи, наблюдающиеся в Керченском проливе и у Черноморского побережья Кавказа, возникают в результате мощных вторжений холода на Кавказ при температуре морской воды более 20 °С. При этом синоптическая ситуация у земли характеризуется погодой, присущей тыловым частям циклонов, в средней тропосфере наблюдается устойчивый западно-восточный перенос воздушных масс со скоростью около 20 м/с. Атмосферные процессы, при которых возможно образование смерчей различной интенсивности, в целом характеризуются перемещением с юга и юго-запада на север и северо-восток циклонов и активных волновых возмущений» [16].

Таблица 1 / Table 1

Средние, среднеквадратичные отклонения, экстремальные значения месячных и годовых величин, а также абсолютные минимумы дальности видимости в районе Крымского мостового перехода, км / Average, standard deviations, extreme values of monthly and annual values, as well as absolute minimums of visibility range in the area of the Crimean bridge crossing, km

Показатель	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
	Керчь, 1946–2017 гг.												
Среднее	9,4	9,2	10,3	12,5	14,4	15,7	15,7	15,9	14,9	13,0	10,9	10,0	12,6
СКО	4,6	4,2	4,9	6,8	7,5	8,4	8,5	8,4	8,1	7,2	5,5	5,0	6,1
Минимум	3,3	4,2	5,1	4,9	7,3	7,7	7,7	7,7	7,2	5,8	4,7	3,8	3,3
Минимум абс.	0,0	0,0	0,05	0,05	0,01	0,13	0,1	0,35	0,0	0,0	0,05	0,05	0,0
	Тамань, 1953–2017 гг.												
Среднее	7,8	7,9	8,8	10,4	12,2	13,7	13,9	13,4	12,4	10,4	8,8	8,5	10,7
СКО	1,6	2,2	1,8	2,5	2,5	2,8	3,0	3,1	3,2	2,0	1,8	1,7	1,8
Минимум	5,2	2,2	5,2	6,8	8,7	9,7	10,2	9,4	8,5	6,8	6,3	5,6	2,2
Минимум абс.	0,02	0,01	0,01	0,05	0,02	0,2	1,0	0,7	0,05	0,05	0,05	0,02	0,01

Таблица 2 / Table 2

Средняя и максимальная продолжительность туманов в районе Крымского мостового перехода, ч / Average and maximum duration of fog in the area of the Crimean bridge crossing, hours

Показатель	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
	Керчь, 1946–2017 гг.												
Среднее	5,7	5,1	4,9	4,3	4,2	3,0	3,0	3,0	3,2	3,5	5,1	4,9	4,3
Максимум	42	48	24	18	18	3	3	3	6	12	36	24	48
Год	1962	1971	1946	1946	1946	1946, 1948–1951, 1962, 1969	1947–1949, 1951	1946, 1946, 1957, 1969	1948	2013	1971	1970	1971
	Тамань, 1953–2017 гг.												
Среднее	6,0	5,2	4,8	4,2	3,4	3,0	0,0	3,0	3,7	4,9	6,2	6,8	4,3
Максимум	36	24	24	24	6	3	0	3	6	18	42	60	60
Год	1955	1963	1955	1989	1962	1954, 1989	-	1953, 2003	1986, 1989	2004	1959	2006	2006

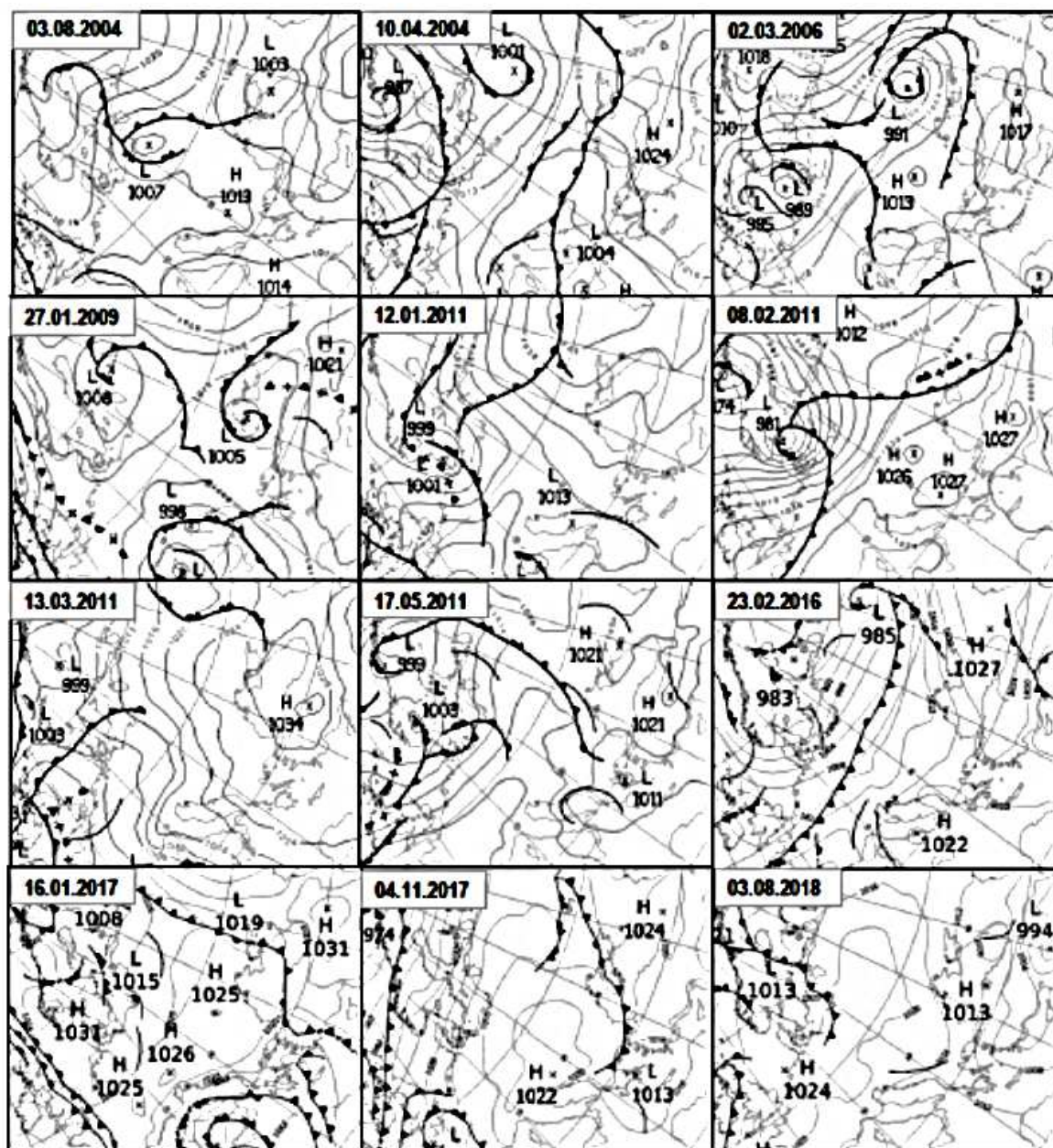


Рис. 3. Типичные синоптические ситуации при формировании сильных туманов (с видимостью 50 м и менее) в акватории Керченского пролива по данным карт приземного анализа на 00:00 / Fig. 3. Typical synoptic situations during the formation of heavy fog (visibility 50 m or less) in the Kerch Strait waters according to the maps of surface analysis as of 00:00

В последние 10 лет в районе Керченского пролива регистрируются маломощные водяные смерчи, практически не выходящие на сушу. Однако потенциально возможно действие сильных смерчей, в частности 20 сентября 1927 г. наблюдался сильный смерч у берега в районе северной узости (Еникале), приведший к гибели рыбака.

Глобальное потепление и, как следствие, климатические изменения увеличивают вероятность образования смерчей в Керченском проливе, что, в свою очередь, может представлять потенциальную опасность для судов, находящихся в проливе, и Крымского моста.

Ледовые условия в Керченском проливе являются важнейшей гидрометеорологической характеристикой, оказывающей влияние на эксплуатацию гидротехнических сооружений. В целом Керченский пролив характеризуется неустойчивым ледовым режимом [2, 17].

Наиболее сложная ледовая обстановка в Керченском проливе, включая и район мостового перехода, может наблюдаться в умеренные и особенно суровые зимы.

Лёд в Керченском проливе появляется ежегодно, но значительно позже, чем в Азовском море, и мощность его меньше. Это объясняется, во-первых, более южным положением, а во-вторых, близостью теплого Черного моря и водообменом с ним. Северная часть пролива до косы Тузла наиболее ледовита.

Процесс льдообразования в Керченском проливе проходит замедленно по сравнению с Азовским морем. В виде заберегов лед появляется только во второй декаде декабря, постепенно распространяясь на остальную часть прибрежной полосы. Сплошной ледяной покров, образующийся, как правило, не ранее января, устанавливается только к северу от о. Тузла, его мощность и общая площадь распространения зависят от суровости зимы при смерзании плавучих льдов, выносимых из Азовского моря. Местный лед образуется редко.

Южная часть пролива является менее ледовитой, чем северная: выносимые из Азовского моря плавучие льды наблюдаются как в середине, так и в конце зимы. Частая смена отрицательных и положительных температур, а также сильные ветры и течения зимой способствуют повторным вскрытиям и замерзанию пролива.

При морозах и сильных северных и северо-восточных ветрах у входа в пролив образуются большие скопления сплоченных и торосистых льдов; при южных ветрах и течениях из Черного моря пролив быстро освобождается от сплошного льда. Окончательное очищение пролива ото льда в умеренно холодные зимы происходит к концу февраля, в суровые – только к началу апреля.

Наибольшей толщины ледяной покров в среднем достигает в конце февраля – марте и составляет примерно 20–25 см. В умеренные зимы ледовитость в Керченском проливе изменяется в широких пределах – от 0 до 771 км² (при общей площади пролива 805 км²). В среднем в январе-феврале она составляет 513 км² – 64 % акватории (рис. 4). В суровые зимы толщина ровного припайного льда может достигать 40–60 см.

В суровые зимы ледовая обстановка в Керченском проливе наиболее тяжелая. Всего за период 1924–2018 гг. здесь было зафиксировано 14 суровых зим (15 % от общего числа всех зимних сезонов). В такие зимы сплоченность льда в районе расположения мостового перехода увеличивается до 7–10 баллов. Ледовитость Керченского пролива в последней декаде января – феврале суровых зим в среднем составляет 685 км² (льдами покрыто около 85 % акватории) [2].

Следует отметить, что вышеперечисленные тяжелые ледовые условия в настоящее время в Керченском проливе наблюдаются редко. Последняя суровая зима в Азово-Керченском бассейне была 35 лет назад (в 1987 г.). В последние 45 лет (1977–2022 гг.) наибольшую повторяемость (56 %) имеют мягкие зимы.

За период проектирования и строительства Крымского мостового перехода (2014–2019 гг.) все зимы в азово-керченском регионе были отнесены к мягким. Из них ледовые сезоны 2014–2015, 2015–2016, 2018–2019 гг. были аномально теплыми, и лёд в Керченском проливе, южной части Азовского моря не образовывался совсем [2].

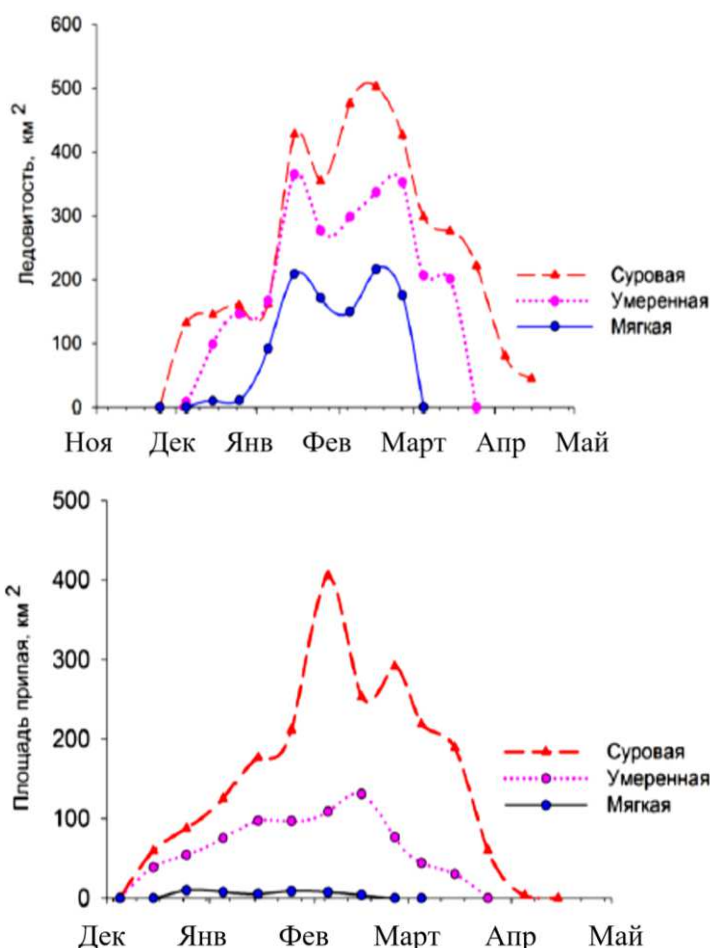


Рис. 4. Осредненная подекадно ледовитость и площадь припая в Керченском проливе за 1950–2018 гг., км² [2]
/ Fig. 4. Average decadal ice coverage and landfast ice area in the Kerch Strait for 1950–2018, km² [2]

Необходимость проведения ледового мониторинга появилась зимой 2016–2017 гг., когда расчетная величина суммы отрицательных температур воздуха в этот ледовый сезон на севере Азовского моря и в Таганрогском заливе составила ниже $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и была несколько меньше порогового критерия ($-200\text{...}-400\text{ }^{\circ}\text{C}$) для классификации зимы по типу умеренной, что способствовало интенсивному ледообразованию в этих районах моря [2]. Ветровое перераспределение и дрейф льда из Азовского моря в Керченский пролив создавали непосредственную угрозу временным гидротехническим сооружениям мостового перехода.

При проведении ледового мониторинга СО ГОИН использовались визуальные береговые наблюдения за ледовой обстановкой; аэрофотосъемка с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА); спутниковый мониторинг; проводились инструментальные измерения ледовых характеристик в проливе, отбор проб и испытания физико-механических свойств морского льда.

С 27 января 2017 г. над акваторией Азовского моря произошло резкое понижение температуры воздуха (от $-10,0$ до $-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), сопровождающееся сильным ветром северо-западного направления, в результате чего наблюдались процессы интенсивного выхолаживания поверхностного слоя воды и понижения его температуры до точки замерзания. Спутниковые данные показывали, что после завершения процессов выхолаживания поверхностных вод в течение недели при температуре воздуха от $-1,0$ до $-8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, произошло интенсивное образование льда, охватившее к началу февраля большую часть Азовского моря. Практически за неделю (с 23 по 31.01.2017 г.) вся акватория моря, включая Керченский пролив, оказалась покрыта льдом (первичными формами). Такое быстрое образование льда в Азовском море наблюдается в редких случаях.

8 февраля 2017 г. произошла смена погодных условий: потепление, отмечавшееся в предыдущие дни, сменилось резким понижением температуры воздуха, сопровождавшимся сильным северо-восточным ветром $8\text{--}12\text{ м/с}$. Такой характер погоды, с кратковременным ослаблением ветра, сохранялся до 12.02.2017 г. В Азовском море происходило повсеместное ледообразование.

Период ледообразования и наиболее тяжелых ледовых условий в Керченском проливе отмечался с 10.02 по 15.02.2017 г. К началу выезда экспедиционных групп СО ГОИН (09.02.2017 г.) на Керченский и Таманский полуострова для проведения экспедиционной части ледового мониторинга Азовское море было практически полностью покрыто льдом, который под действием северо-восточного ветра активно дрейфовал в южном направлении (рис. 5).



Рис. 5. Ледовая обстановка в Керченском проливе 11 февраля 2017 г. (съемка с ИСЗ SPOT в видимом диапазоне спектра) по [2] / Fig. 5. Ice conditions in the Kerch Strait on February 11, 2017 (SPOT satellite imagery in the visible spectrum) according to [2]

Наблюдалось затрудненное пропускание льда через межсвайное пространство на всем протяжении перехода, с характерным нарезанием льда на прямоугольные фрагменты под напором ледяных полей с севера, что приводило к усилению нагрузки на сваи гидротехнических сооружений временного мостового перехода (рис. 4) и требовало проведения непрерывных мониторинговых наблюдений с помощью БПЛА во избежание повреждений временных сооружений моста [2].

За весь ледовый период 2017 г. максимальная толщина льда, зафиксированная в прибрежных районах Керченского пролива и его северной узости со стороны Керченского полуострова, не превысила 17 см, изменяясь в среднем от 15 до 16 см в наиболее благоприятный период для льдообразования – второй декаде февраля [2].

В Таманском заливе максимальная измеренная толщина неподвижного льда 12.02.2017 г. в районе причала о. Тузла составила 14 см и достигла критической опасной величины для временных сооружений моста. В период с 11 по 17 февраля 2017 г. средняя толщина льда (припая) в Таманском заливе составляла 13 см и была меньше критической величины [2].

Выводы

В результате исследований были проанализированы опасные гидрометеорологические явления Керченского пролива, которые могут оказать влияние на безопасную эксплуатацию транспортного перехода.

Выполненные исследования показали, что в прибрежной зоне и в акватории Керченского пролива периодически возникают опасные метеорологические явления: сильный штормовой или ураганный ветер, сильные осадки, туманы, значительно ухудшающие видимость и затрудняющие морские грузоперевозки в проливе, грозы и смерчи.

Сильное ухудшение горизонтальной видимости может затруднять движение транспорта по Крымскому мосту.

В среднем за год дальность видимости на побережье пролива – 11–15 км, достигает максимальных величин (13–17 км) в летний сезон и уменьшается до 8–12 км в холодный период года. В любое время года, кроме июля-августа, видимость может уменьшаться до 0–100 м. Такое ограничение видимости в подавляющем большинстве случаев вызвано туманами, реже обусловлено снегом, метелью, сильным дождем или дымкой. В Керчи среднемноголетнее количество дней в году с туманом составляет 33, мглой – 1, дождем – 111, снегом – 30, метелью – 5, пыльными бурями – 0,5. Количество дней с дымкой – 137.

Анализ ледовой обстановки в сезон 2016–2017 гг. показал, что конструкции моста задерживают лед, скорость движения которого превышает 0,28 м/с, и способствует заторам. Это приводит к образованию торосов, стамух, подсовов и навалов льда на сваи и опоры моста. При меньшей скорости дрейфа полей лед проходит между опорами моста беспрепятственно. В целом, даже в условиях мягкой зимы, ледовая обстановка в районе Крымского мостового перехода была непростой.

Конструкции моста смогут задерживать дрейфующий лед, особенно если его толщина составит 30–60 см. При интенсивном дрейфе полей на опоры возможен навал льда высотой 5–12 м, что, принимая во внимание илистые грунты на дне пролива, не исключает возможность подвижки и повреждения опор моста. Учитывая вышесказанное, в случае ледовитых умеренных и суровых зим необходимо проводить ледовый мониторинг, уделив особое внимание дрейфу льда на опоры моста, торосистости и процессам ледовой экзарации.

Список источников

1. Сьтник Н.А. Расчет размера вреда водным биологическим ресурсам при строительстве железнодорожных подходов к транспортному переходу через Керченский пролив // Вестн. КГМТУ. 2022. № 2. URL: <https://www.ejkgmtu.ru/wpcontent/uploads/8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA-2-2022-%D0%B3.pdf> (дата обращения: 09.11.2022).

2. Дьяков Н.Н., Фомин В.В., Цветинский А.С., Липченко А.Е., Лукин Д.В., Полозок А.А., Фомина И.Н., Тимошенко Т.Ю., Белогудов А.А., Левицкая О.В. Современные гидрометеорологические условия формирования ветро-волновых, ледовых и других опасных явлений в Керченском проливе. Севастополь: Росгидромет, СО ГОИН, 2019. 365 с.

3. Цыбульский И.Е., Дорошенко М.Г., Коваленко Т.А. Оценка воздействия и определение вреда водным биологическим ресурсам по объекту «Строительство железнодорожных подходов к транспортному переходу через Керченский пролив. Корректировка»: отчет о науч.-исслед. работе. Ростов н/Д., 2018. 226 с.
4. Алексеев С.В., Британ А.В. Строительство железнодорожных подходов к транспортному переходу через Керченский пролив. Т. 1.4.5.3, ч. 4: Отчетная документация по инженерным изысканиям. Кн. 5: Технический отчет. Инженерно-экологические изыскания. Ч. 3: 5841.01-ПЗ4. ИЭЗ. СПб., 2018.
5. Алексеев С.В., Британ А.В. Строительство железнодорожных подходов к транспортному переходу через Керченский пролив. Т. 7.1, ч. 1: Мероприятия по охране окружающей среды. СПб., 2018.
6. Альбов С.В. Гидрогеология Крыма. К.: АН УССР, 1956. 280 с.
7. Андрусов Н.И. Геотектоника Керченского полуострова // Материалы по геологии России. 1893. Т. 16. С. 63–336.
8. Карлин Л.Н., Музалевский А.А. Экологические риски: теория и практика. СПб.: РГГМУ, 2011. 446 с.
9. Котляков В.М., Кочуров Б.И., Коронкевич Н.И., Антипова А.В., Денисова Т.Б. Подходы к составлению экологических карт СССР // Изв. РАН. Сер. геогр. 1990. № 4. С. 61–70.
10. Лычак А.И. Некоторые аспекты разработки методики оценки геоэкологических ситуаций в Крыму на ландшафтной основе // Культура народов Причерноморья. 1999. № 5. С. 398–400.
11. Шестаков А.С. Эколого-географические ситуации – интегральное отражение состояния окружающей среды // Оценка качества окружающей среды и экологическое картографирование. М.: ИГ РАН, 1995. С. 39–52.
12. Никонов А.А. Реальные опасности геодинамического ряда в районе строительства Керченского мостового перехода // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. М.: РУДН, 2016. Т. 18. С. 325–330.
13. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1: Азовское море. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 402 с.
14. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2: Черное море. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
15. РД 52.04.563-2013. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями. М., 2013.
16. Снитковский А.И. Смерчи на территории СССР // Метеорология и гидрология. 1987. № 9. С. 12–25.
17. Панов Б.Н., Спиридонова Е.О., Пятинский М.М., Арутюнян А.С. Результаты мониторинга температурных условий миграции и промысла азовской хамсы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 1. С. 71–78.

References

1. Sytnik N.A. Calculation of the amount of damage to aquatic biological resources during the construction of railway approaches to the Kerch Strait transport crossing. *Vestn. KGMTU = Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2022;(2). Available from: <https://www.ejkgmtu.ru/wp-content/uploads/2022/06/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA-2-2022-%D0%B3.pdf> [Accessed 9th November 2022]. (In Russ.).
2. D'yakov N.N., Fomin V.V., Tsvetsinskiy A.S., Lipchenko A.E., Lukin D.V., Polozok A.A., Fomina I.N., Timoshenko T.Yu., Belogudov A.A., Levitskaya O.V. *Modern hydrometeorological conditions of formation of wind-wave, ice and other dangerous phenomena in the Kerch Strait*. Sevastopol: Roshydromet, Sevastopol Branch of the Zubov State Oceanographic Institute Press; 2019. 365 p. (In Russ.).
3. Tsybul'skiy I.E., Doroshenko M.G., Kovalenko T.A. *Impact assessment and determination of damage to aquatic biological resources for the object: "Construction of railway approaches to the transport crossing through the Kerch Strait. Correction"*. Research report. Rostov-on-Don, 2018. 226 p. (In Russ.).
4. Alekseev S.V., Britan A.V. *Construction of railway approaches to the transport crossing through the Kerch Strait. Vol. 1.4.5.3, part 4: Reporting documentation for engineering surveys. Book 5: Technical report. Engineering and environmental surveys. Part 3*. Saint Petersburg, 2018. (In Russ.).
5. Alekseev S.V., Britan A.V. *Construction of railway approaches to the transport crossing through the Kerch Strait. Vol. 7.1, part 1: Environmental protection measures*. Saint Petersburg, 2018. (In Russ.).
6. Al'bov S.V. *Hydrogeology of the Crimea*. Kiev: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Publ.; 1956. 280 p. (In Russ.).
7. Andrusov N.I. Geotectonics of the Kerch Peninsula. *Materials on the Geology of Russia*. 1893;16:63-336. (In Russ.).
8. Karlin L.N., Muzalevskiy A.A. *Environmental risks: Theory and practice*. Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University Press; 2011. 446 p. (In Russ.).
9. Kotlyakov V.M., Kochurov B.I., Koronkevich N.I., Antipova A.V., Denisova T.B. Approaches to making ecological maps of the USSR. *Izv. RAN. Ser. geogr.* 1990;(4):61-70. (In Russ.).

10. Lychak A.I. Aspects of the development of geo-ecological situations assessment methodology in the Crimea on the landscape basis. *Kul'tura narodov Prichernomor'ya = Culture of the Black Sea Peoples*. 1999;(5):398-400. (In Russ.).

11. Shestakov A.S. Ecological and geographical situations - integral reflection of the state of the environment. *Environmental quality assessment and ecological mapping*. Moscow: Institute of Geography, Russian Academy of Sciences Press; 1995:39-52. (In Russ.).

12. Nikonov A.A. Real hazards of the geodynamic series in the Kerch bridge construction area. *Sergeev Readings. Engineering Geology and Geoecology. Fundamental Problems and Applied Problems*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia Press; 2016;18:325-330. (In Russ.).

13. *Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine. Vol. 1: The Sea of Azov*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika Publ.; 2009. 402 p. (In Russ.).

14. *Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine. Vol. 2: The Black Sea*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika Publ.; 2012. 421 p. (In Russ.).

15. RD 52.04.563-2013. *Instruction on preparation and transmission of storm messages by observation units*. Moscow, 2013. (In Russ.).

16. Snitkovskiy A.I. Tornadoes on the territory of the USSR. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1987;(9):12-25. (In Russ.).

17. Panov B.N., Spiridonova E.O., Pyatinskiy M.M., Arutyunyan A.S. Results of monitoring of temperature conditions of migration and fishery of Azov khumys. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(1):71-78. (In Russ.).

Информация об авторе

Н.А. Сытник – кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедрой экологии моря.

Information about the author

N.A. Sytnik - Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Marine Ecology.

Статья поступила в редакцию 18.03.2023; одобрена после рецензирования 08.07.2023; принята к публикации 30.10.2023, дополнена 04.12.2023.

The article was submitted 18.03.2023; approved after reviewing 08.07.2023; accepted for publication 30.10.2023, updated 04.12.2023.

Научная статья
УДК 594.1+574.9
doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-149-155

ЧУЖЕРОДНЫЕ МОЛЛЮСКИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЧАСТИ ДАГЕСТАНСКОГО РАЙОНА КАСПИЙСКОГО МОРЯ

**Марина Владимировна Хлопкова^{1✉}, Руслан Магомедович Бархалов²,
Кайс Магомедович Гусейнов³, Айша Шарапатовна Гасанова⁴**

^{1, 2, 3, 4}Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального научного центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

²Государственный природный заповедник «Дагестанский», Махачкала, Республика Дагестан, Россия

⁴Махачкалинский филиал Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹hlopkovam@mail.ru✉

²barkhalov.ruslan@yandex.ru

³kais61@mail.ru

Аннотация. В эстуарии проникли чужеродные для экосистем российского сектора Среднего Каспия виды *Corbicula fluminea* и *C. fluminalis* (O.F. Müller, 1774), формируя новые экотоны. Моллюски рода *Corbicula* включены в сто самых активно распространяющихся вселенцев по всему миру. В 2018–2022 гг. в акватории северной части Аграханского залива, в районе Чеканные ворота, Кубякинский банк, Кузнечок, обнаружены живые особи двустворчатого моллюска *C. fluminalis* (O.F. Müller, 1774). Впервые в Присулакском канале и Юзбаи-Сулакском коллекторе зафиксированы находки разновозрастных экземпляров *C. fluminalis* и *C. fluminea*. Наблюдается расширение ареала обитания корбикул в исследуемом районе. Вероятные пути инвазий: занесение личинок корбикул в бассейн Каспийского моря с балластными водами судов, курсирующих через Волго-Донской канал; при интродукции азиатских видов рыб во внутренние водоемы Дагестана; перенос водоплавающими птицами. Высокие адаптивные способности и разные стратегии размножения моллюсков рода *Corbicula* повышают возможность успешной натурализации в эстуарных и пресноводных экосистемах дагестанского района Каспийского моря, а также в опресненных участках вблизи устьев рек Северного Каспия и северной части Среднего Каспия.

Ключевые слова: *Corbicula fluminea*, *C. fluminalis*, чужеродные виды, бассейн Каспийского моря

Для цитирования: Хлопкова М.В., Бархалов Р.М., Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш. Чужеродные моллюски в прибрежной части дагестанского района Каспийского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 149–155.

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

Original article

ALIEN MOLLUSKS IN THE COASTAL PART OF THE DAGESTAN REGION OF THE CASPIAN SEA

Marina V. Khlopkova^{1✉}, Ruslan M. Barkhalov², Kais M. Guseynov³, Aysha Sh. Gasanova⁴

^{1, 2, 3, 4}Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

²Dagestan State Nature Reserve, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

⁴Makhachkala Branch of the Moscow Automotive and Road State Technical University (MADI), Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

¹hlopkovam@mail.ru✉

²barkhalov.ruslan@yandex.ru

³kais61@mail.ru

© Хлопкова М.В., Бархалов Р.М., Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш., 2023

Abstract. The species *Corbicula fluminea* and *C. fluminalis* (O.F. Müller, 1774), alien to the ecosystems of the Russian sector of the Middle Caspian, penetrated into the estuaries, forming new ecotones. Mollusks of the genus *Corbicula* are included in one hundred of the most actively spreading universes around the world. In 2018-2022, live individuals of the bivalve mollusk *C. fluminalis* (O.F. Müller, 1774) were found in the waters of the northern part of the Agrakhan Bay, in the area of the Chased Gate, Kubyakinsky Bank, Kuznechonok. For the first time, finds of *C. fluminalis* and *C. fluminea* specimens of different ages were recorded in the Prisulak canal and the Yuzbash-Sulak reservoir. There is an expansion of the habitat of corbicules in the study area. Possible ways of invasion are assumed: introduction of corbicule larvae into the Caspian Sea basin with ballast waters of ships plying through the Volga-Don Canal; introduction of Asian fish species into the inland waters of Dagestan; transfer by waterfowl. High adaptive abilities and different breeding strategies of *Corbicula* mollusks increase the possibility of successful naturalization in estuarine and freshwater ecosystems of the Dagestan region of the Caspian Sea, as well as in desalinated areas near the mouths of the rivers of the Northern Caspian and the northern part of the Middle Caspian.

Keywords: *Corbicula fluminea*, *C. fluminalis*, alien species, Caspian Sea basin

For citation: Khlopkova M.V., Barkhalov R.M., Guseynov K.M., Gasanova A.Sh. Alien Mollusks in the Coastal Part of the Dagestan Region of the Caspian Sea. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(4):149-155. (In Russ.).

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

Случайное проникновение чужеродных видов в бассейн Каспийского моря происходило на протяжении всего плейстоцена, но в последнее время значительно прогрессировало. Инвазии новых видов происходят, как правило, через эстуарии, в которых могут находиться незанятые экологические ниши. Распространение моллюсков *Corbicula* ограничивалось обычно солевым и температурным режимами. В последние годы изменение климата стало пусковым механизмом в стремительном распределении корбикул [1]. Одной из задач нашего исследования был мониторинг новых ареалов обитания инвазивного моллюска *Corbicula*.

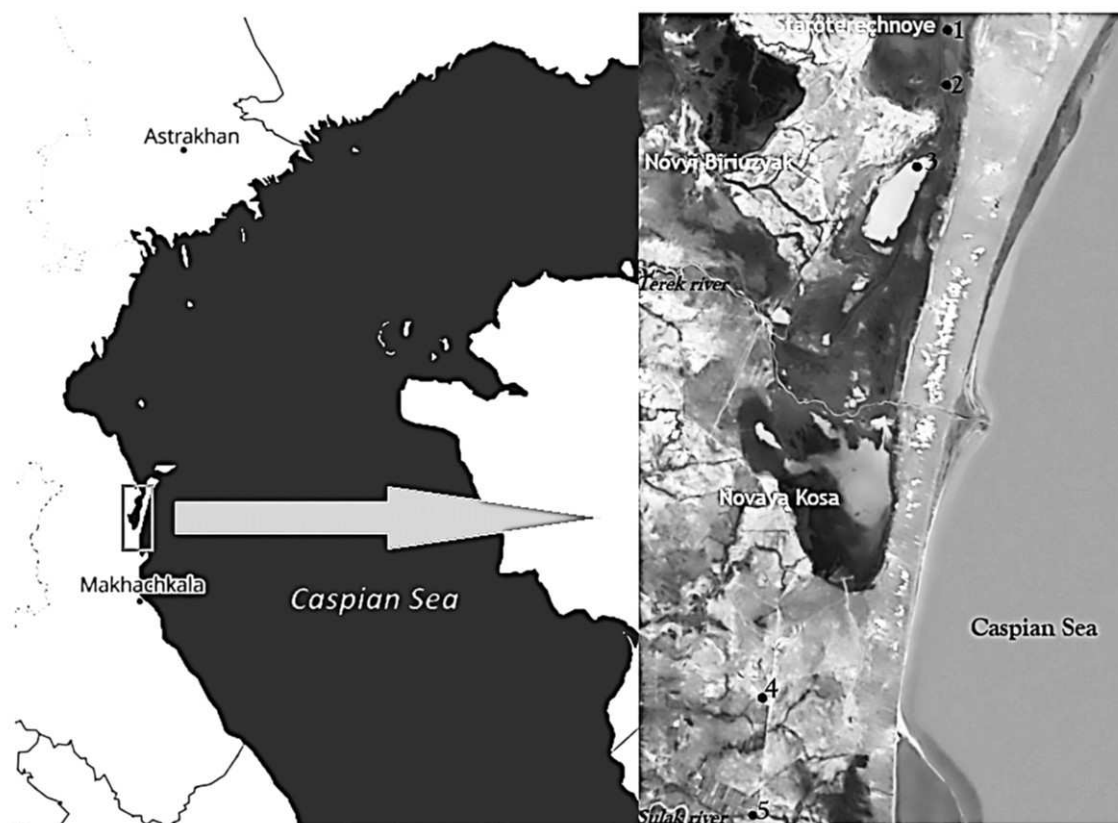
Материал и методы

Объектом исследования являются моллюски. Бентосные пробы отбирались с использованием дночерпателя Петерсена – малой модели с площадью охвата 0,025 м. Собранные пробы фиксировали 4%-м формалином. Камеральная обработка проводилась по общепринятым методикам [2, 3].

Результаты и обсуждение

В сезонных съемках с 2017 по 2023 г. проводилось изучение видового состава малакофауны экосистем Кизлярского залива, северной части Аграханского залива и побережья Каспия (рис. 1). В 2017 г. впервые обнаружены раковины *Corbicula fluminalis* (O.F. Müller, 1774) на побережье Каспийского моря в 25 км от г. Махачкалы [4]. В 2018 г. в оз. Кузнечонок были впервые обнаружены 2 живые особи *C. fluminalis* [5]. В 2019 г. в устье реки Сулак зафиксированы 2 особи другого вида *C. fluminea*. В 2021 г. в Присулакском канале, Юзбаш-Сулакском коллекторе зафиксированы экземпляры *C. fluminalis* и *C. fluminea* (рис. 2) [6]. В пробах доминировали моллюски в возрасте до 3 лет, что указывает на их недавнее вселение в новый водоем. В 2022 г. в акватории северной части Аграханского залива, уже на новых участках: Чеканные ворота, Кубякинский банк, на глубине до 2 м обнаружены живые разновозрастные особи *C. fluminalis*. В Махачкалинском морском торговом порту также найдены 2 экземпляра живых корбикул *C. fluminea*. Таким образом, ареал обитания корбикул с каждым годом расширяется.

Сравнение видового состава моллюсков в исследованных районах представлено в таблице. В Кизлярском заливе, в устье р. Кума, доминирует вселенец *Dreissena bugensis*, встречается другой вселенец *Lithoglyphus naticoides*. В биоценозах Северного Аграхана доминирует новый инвазивный вид *C. fluminalis*. Встречаются также другие вселенцы *Dr. bugensis*, *L. naticoides*. В оз. Кузнечонок и Присулакском канале доминирует *C. fluminalis*. В Юзбаш-Сулакском коллекторе доминируют *C. fluminea* и *C. fluminalis*.



1 – оз. Кузнечонок (43°45'45.2" – 43°46'06.5"с.ш., 47°29'57.4" – 47°30'07.1" в.д.); 2 – район Карамурза в северной части Аграханского залива (43°49'42.7" – 43°49'57.4"с.ш., 47°32'22.5" – 47°32'40.3" в.д.); 3 – канал Присулакский (43°19'36.5" – 43°19'41.4"с.ш., 47°20'30.5" – 47°21'09.6" в.д.); 4 – Юзбаш-Сулакский коллектор (43°24'31.3" – 43°25'09.5"с.ш., 47°21'29.3" – 47°22'29.0" в.д.); 5 – Кубякинский банк (43°51'29.2" – 43°51'31.9"с.ш., 47°30'38.4" – 47°31'30.1" в.д.)

Рис. 1. Места обнаружения и сбора корбикул (космоснимок – Google Earth)
/ Fig.1. Places of detection and collection of corbicules (Google Earth)



Рис. 2. *Corbicula fluminalis* из Присулакского канала (слева) и *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774) из Юзбаш-Сулакского коллектора (справа) / Fig. 2. *Corbicula fluminalis* from the Prislak canal (left) and *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774) from the Yuzbash-Sulak reservoir (right)

В пробе из района острова Чечень (24К (14), (43°58.48"с.ш., 48°38.24" в.д.) доминируют *D. protracta* и *Dr. polymorpha*, субдоминант *Monodacna caspia*, реже встречаются *Cerastoderma glaucum*, *Theodoxus pallasii*, *Abra ovata*, в этом биоценозе встречаются редкие виды гастропод *Purgula curta* и *Purgohydrobia conica*. В пробе из района о. Тюлений (в точке 20К (15), 44°18'36"с.ш., 47°38'6"в.д.) доминирует *M. caspia*, субдоминант *Abra ovata*. В богатых по видовому составу бентосных пробах северной части Среднего Каспия корбикула не обнаруживается (таблица). В выборке из района пляжа «Березка» (47°47'82"с.ш., 42°99'77" в.д.) доминирует *C. glaucum*.

С раннего плейстоцена моллюски рода *Didacna* были руководящими видами. Со второй половины голоцена и до наших дней аутоакклиматизант средиземноморского генезиса *C. glaucum* являлся, как правило, доминирующим видом во многих исследованных биоценозах дагестанского побережья Каспийского моря. Но высока вероятность того, что в скором времени представители рода *Corbicula* или другие вселенцы вытеснят эти виды в биоценозах.

**Встречаемость автохтонных моллюсков и вселенцев в бассейне Среднего Каспия, 2022–2023 гг.
/ Occurrence of autochthonous mollusks and invasive species in the Middle Caspian basin, 2022-2023**

Таксон	Кизлярский залив, устье Кумы	Кубякинский банк, Чеканные ворота	Оз. Кузнечное	Присулакский канал	Юсбаш-Сулакский коллектор	24К(14) в районе о. Чечень	20К(15) в районе о. Тюлений	Пляж «Березка»
BIVALVIA								
<i>Didacna trigonoides</i>	–	+	–	–	–	–	–	+
<i>Didacna barbotdemarnyi</i>	–	+	–	–	–	–	–	+
<i>D. protracta</i>	–	–	–	–	–	+++	–	+
<i>Cerastoderma glaucum</i>	–	+	–	–	–	++	–	+++
<i>Monodacna caspia</i>	+	+	–	–	–	++	+++	++
<i>Adacna vitrea</i>	+	–	–	–	–	+	–	–
<i>Adacna angusticostata</i>	–	–	–	–	–	–	+	+
<i>Dr. polymorpha andrusovi</i>	+	+	–	–	–	+++	+	++
* <i>Dreissena bugensis</i>	+++	+	–	–	–	–	–	–
<i>Abra ovata</i>	–	–	–	–	–	++	++	+
* <i>Corbicula fluminalis</i>	–	+++	+++	+++	–	–	–	–
* <i>Corbicula fluminea</i>	–	–	–	++	+++	–	–	–
GASTROPODA								
<i>Theodoxus pallasi</i>	++	+	–	–	–	++	–	++
<i>Purgula curta</i>	–	–	–	–	–	+	–	–
<i>Purgohydrobia conica</i>	–	–	–	–	–	+	–	–
* <i>Lithoglyphus naticoides</i>	+	+	–	–	–	+	–	–

* – обозначены инвазивные виды.

Пути проникновения чужеродных моллюсков

Из антропогенных факторов, повышающих вероятность инвазий корбикул в дагестанском районе Каспийского моря в последнее время, следует отметить возросший поток речных и морских грузоперевозок, проходящих из Азовского и Черного морей по Волго-Донскому каналу в Махачкалинский торговый порт (единственный незамерзающий порт России на Каспии).

После открытия Волго-Донского канала Каспийское море теряет свою уникальность изолированного солоноватоводного водоёма из-за постоянного проникновения чужеродных организмов по северному инвазионному коридору. Так, в 1999 г. через Азовское море и далее Волго-Донской канал гребневик заселил Каспийское море, нарушив пищевую цепочку, что привело к сокращению численности кильки на 60 % и популяций осетровых и тюленя [4].

В период с 2015 по 2017 г. инвазивные моллюски рода *Corbicula* одновременно были обнаружены в низовьях Дона, Волги и на побережье Каспийского моря [4, 7–9]. Корбикула быстро расширяет свой ареал, осваивает новые территории речных систем, соединяющихся через Волго-Донской канал. Если в 2015 г. в Горьковском водохранилище были обнаружены единичные ювенильные особи нового инвазивного моллюска, то всего лишь через 2 года выявлены популяции

C. fluminea не только в водохранилище Костромской ГРЭС, но и в нижнем течении Дона, в устье р. Маныч, в подогретых водах водоёмов-охладителей Новочеркасской ГЭС. К настоящему времени в водоемах бассейна р. Волга натурализовалась и образовалась самовоспроизводящаяся популяция *C. fluminea*, идентичная популяциям корбикул из Европы и Америки [1, 8]. Она стала источником дальнейшего распространения вида, что мы и наблюдаем в наших исследованиях.

В этот же период выявлена самая северная находка представителей рода *Corbicula* в России и мире – это популяции *C. fluminalis* и *C. fluminea*, обнаруженные в подогретых водах Архангельской ТЭС на р. Северная Двина, в бассейне Белого моря [10].

В период с 2015 по 2021 г., помимо двустворчатых моллюсков корбикул, в дагестанский район Прикаспия проникли: ракообразные – японская креветка, полихеты, рыбы – амурский чебачок, корейская востробрюшка. Так, в июне 2017 г. в р. Дон (в окрестностях устья р. Маныч) был пойман 1 экземпляр японской креветки *Macrobrachium sp.*, а в 2020 г. этот вид уже найден в реке Терек [6]. Анализ последовательности находок разных вселенцев подтверждает наше предположение о попадании личинок корбикул по северному инвазионному коридору (с балластными водами судов, через Волго-Донской канал). В мае 2023 г. в Северном Каспии обнаружен новый вселенец – черноморская мидия *Mytilus galloprovincialis*.

Появление вселенцев в изолированных водоемах, таких как оз. Кузнечонок, также может быть обусловлено антропогенными факторами. Не исключен случайный перенос личинок моллюсков вместе с ихтиологическим материалом (икра, мальки) дальневосточных видов рыб (толстолобик и белый амур) из прудовых хозяйств бассейна р. Амур, при зарыблении внутренних водоемов Дагестана. Оптимальные условия обитания для развития корбикул наблюдаются в мелководном эстуарии р. Амур – Амурском лимане, постепенный переход от опресненных (от 0,5 до 4 ‰) речных водных масс к морским (12–18 ‰) происходит там в течение года [3]. На дагестанском побережье для корбикул подобные условия могут быть в мелководных Кизлярском, Сулакском и Аграханском заливах. Соленость в них колеблется от 0,5 до 6 ‰ в зависимости от сезона и сгонно-нагонных явлений.

Возможен также перенос моллюсков водными птицами (биотический фактор). Различные водные и околоводные птицы (кулики, крачки, цапли, бакланы) стаями перемещаются по отмели в поисках пищи. Птицы могут случайно ножками попасть в раскрытые створки раковин, которые при захлопывании ущемляют ноги птиц. Корбикулы адаптированы к транспортировке между изолированными бассейнами рек, могут долго обходиться без воды. Как известно, через территорию Дагестана проходит крупнейший в России Западно-Каспийский пролётный путь, где пересекаются трассы пролёта европейских и азиатских мигрантов, что увеличивает шансы для расселения этих малоподвижных моллюсков на большие расстояния.

Экологические прогнозы расселения корбикул в дагестанском районе Каспийского моря неоднозначны. Двустворчатые моллюски являются фильтраторами, они аккумулируют вредные вещества из донных осадков. Однако, попадая в новые условия корбикулы, за счёт активной фильтрации могут сократить численность личинок других моллюсков, конкурировать с местными видами за пищевые ресурсы, быстро увеличивая свою численность, в отсутствие естественных врагов, изменить существующие биоценозы.

Для каспийских рыб корбикула может стать прекрасной кормовой базой. Известно, что родственный вид *C. fluminalis C. japonica* является основным объектом питания амурского осетра *Acipenser schrenskii* (Brandt, 1869), поэтому не исключено появление нового кормового объекта у осетровых рыб, обитающих в Каспийском море.

В Аграханском заливе сформировался пресноводно-солонатоводный комплекс гидробионтов, сложились условия, подходящие для вселения чужеродных организмов, таких как двустворчатые моллюски *C. fluminalis* и *C. fluminea* (O.F. Müller, 1774), брюхоногие *Lithoglyphus naticoides*, а также ракообразные – японская креветка *Macrobrachium nipponense*. Благодаря частичной изолированности Аграханский залив может служить своего рода рефугиумом для вселенцев, а в дальнейшем может стать источником более широкого расселения этих видов.

В связи с глобальным изменением климата в последнее десятилетие, повышением температуры в регионе, понижением уровня Каспия и, как следствие, изменением солености и смены биотопов вероятность вселения новых чужеродных видов возрастает.

Резюмируя вышесказанное, можно отметить, что скорость, с которой происходят изменения в структуре донных сообществ в системе Нижний Дон – Волго-Донской канал – устье Волги –

Северный Каспий – устье Терека – Аграханский залив – северная часть Среднего Каспия, подтверждает необходимость проведения дальнейших регулярных экспедиционных исследований и подробного изучения распределения бентосных организмов в этих районах.

Выводы

1. Обнаруженные с 2017 по 2022 г. на дагестанском побережье *Corbicula fluminalis* и *C. fluminea* (O.F. Müller, 1774) – это новые виды двустворчатых моллюсков как для российского сектора Каспия, так и для всей европейской части России.

2. Инвазии новых моллюсков могут привести к вытеснению эндемичных видов. Возможно пополнение кормовой базы ценных промысловых рыб. Солонатоводный моллюск *C. fluminalis* может в ближайшее время освоить заливы, устья рек, районы Северного Каспия (с соленостью от 2 до 5 ‰), северную часть Среднего Каспия (с соленостью от 3 до 8 ‰).

3. Пресноводный моллюск *C. fluminea* в новых для него условиях может быстро размножиться, образовать большие скопления и при массовом развитии заполнить все рыбоводные каналы, водоемы-охладители ТЭЦ и ГРЭС на реках Дагестана.

4. Возможные пути проникновения личинок и взрослых корбикул на российскую территорию: по судоходным каналам (с балластными водами судов); при перевозке ихтиологического материала (икра, личинки и молодь рыб) из прудовых хозяйств бассейна р. Амур во внутренние водоемы Дагестана; посредством переноса мигрирующими водоплавающими и околоводными птицами. Наиболее вероятным источником популяции *C. fluminea*, обнаруженной авторами в прибрежной зоне дагестанского побережья Каспийского моря, служат моллюски, проникшие из водоемов бассейна р. Волга.

Список источников

1. Sousa R., Antunes C., Guilhermino L. Ecology of the invasive Asian clam *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in aquatic ecosystems: an overview // *Annales De Limnologie – Int. J. of Limnology*. 2008. Vol. 44, № 2. P. 85–94.

2. Скарлато О.А. Двустворчатые моллюски умеренных широт западной части Тихого океана. Л.: Наука, 1981. 480 с.

3. Явнов С.В., Раков В.А. Корбикула. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2002. 145 с.

4. Хлопкова М.В., Гусейнов М.К., Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш. К фауне двустворчатых моллюсков дагестанского побережья Каспийского моря // *Юг России: экология, развитие*. 2018. Т. 13, № 2. С. 9–21.

5. Khlopkova M.V., Guseinov K.M., Gasanova A.Sh., Barkhalov R.M., Zurkhaeva U.D., Guseinov M.K. First Record of Live Clams of *Corbicula fluminalis* (Bivalvia: Corbiculidae) in the Dagestan Sector of the Caspian Sea Basin // *Russian J. of Biological Invasions*. 2019. Vol. 10, № 1. P. 79–82.

6. Хлопкова М.В., Бархалов Р.М., Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш., Зурхаева У.Д. Инвазии новых морфотипов *Corbicula fluminalis* и *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae) в бассейн дагестанского района Каспийского моря // *Рос. журн. биол. инвазий*. 2023. № 1. С. 166–179. Doi: 10.35 885/1996-1499-16-1-166-179.

7. Набоженко М.В., Набоженко С.В. *Corbicula fluminalis* (O.F. Müller, 1774) – новый для российского сектора Каспийского бассейна вид двустворчатых моллюсков // *Наука Юга России (Вестн. Южн. науч. центра)*. 2016. Т. 12, № 1. С. 61–64.

8. Ворошилова И.С., Пряничникова Е.Г., Прокин А.А., Сабитова Р.З., Карabanов Д.П., Павлов Д.Д., Куркина Е.М. Морфологические и генетические особенности первой инвазионной популяции восточной корбикулы *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774), натурализовавшейся в бассейне Волги // *Рос. журн. биол. инвазий*. 2020. № 4. С. 45–54.

9. Zhivoglyadova L.A., Revkov N.K. First records of *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774) (Mollusca: Bivalvia) from the Lower Don // *Ecologica Montenegrina*. 2018. Vol. 17. P. 46–52.

10. Bupalaya Y.V., Bolotov I.N., Aksenova O.V., Kondakov A.V., Gofarov M.Y., Laenko T.M., Travina O.V. Aliens are moving to the Arctic frontiers: an integrative approach reveals selective expansion of androgenic hybrid *Corbicula* lineages towards the North of Russia // *Biological Invasions*. 2018. Vol. 20. P. 2227–2243.

References

1. Sousa R., Antunes C., Guilhermino L. Ecology of the invasive Asian clam *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in aquatic ecosystems: an overview. *Annales De Limnologie - International Journal of Limnology*. 2008;44(2):85-94.

2. Scarlato O.A. *Bivalve mollusks of temperate latitudes of the Western Pacific Ocean*. Leningrad: Nauka Publ.; 1981. 480 p. (In Russ.).
3. Yavnov S.V., Rakov V.A. *Corbicula*. Vladivostok: TINRO-Center Press; 2002. 145 p. (In Russ.).
4. Khlopkova M.V., Guseynov M.K., Guseynov K.M., Gasanova A.Sh. To the fauna of bivalve mollusks of the Dagestan coast of the Caspian Sea. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie = South of Russia: Ecology, Development*. 2018;13(2):9-21. (In Russ.).
5. Khlopkova M.V., Guseinov K.M., Gasanova A.Sh., Barkhalov R.M., Zurkhaeva U.D., Guseinov M.K. First Record of Live Clams of *Corbicula fluminalis* (Bivalvia: Corbiculidae) in the Dagestan Sector of the Caspian Sea Basin. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2019;10(1):79-82.
6. Khlopkova M.V., Barkhalov R.M., Guseynov K.M., Gasanova A.Sh., Zurkhaeva U.D. Invasions of new morphotypes of *Corbicula fluminalis* and *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae) into the basin of the Dagestan region of the Caspian Sea. *Ros. zhurn. biol. invaziy = Russian Journal of Biological Invasions*. 2023;(1):166-179, doi: 10.35 885/1996-1499-16-1-166-179. (In Russ.).
7. Nabozhenko M.V., Nabozhenko S.V. *Corbicula fluminalis* (O.F. Müller, 1774) - a new species of bivalve mollusks for the Russian sector of the Caspian basin. *Nauka Yuga Rossii (Vestn. Yuzhn. nauch. tsentra) = Science in the South Russia (Bulletin of the Southern Scientific Center)*. 2016;12(1):61-64. (In Russ.).
8. Voroshilova I.S., Pryanichnikova E.G., Prokin A.A., Sabitova R.Z., Karabanov D.P., Pavlov D.D., Kurina E.M. Morphological and genetic features of the first invasive population of the eastern corbicula *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774) naturalized in the Volga basin. *Ros. zhurn. biol. invaziy = Russian Journal of Biological Invasions*. 2020;(4):45-54. (In Russ.).
9. Zhivoglyadova L.A., Revkov N.K. First records of *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774) (Mollusca: Bivalvia) from the Lower Don. *Ecologica Montenegrina*. 2018;17:46-52.
10. Bepalaya Y.V., Bolotov I.N., Aksenova O.V., Kondakov A.V., Gofarov M.Y., Laenko T.M., Travina O.V. Aliens are moving to the Arctic frontiers: An integrative approach reveals selective expansion of androgenic hybrid *Corbicula* lineages towards the North of Russia. *Biological Invasions*. 2018;20:2227-2243.

Информация об авторах

М.В. Хлопкова – кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория морской биологии.
Р.М. Бархалов – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория морской биологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН; старший научный сотрудник, Государственный природный заповедник «Дагестанский».
К.М. Гусейнов – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория морской биологии.
А.Ш. Гасанова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория морской биологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов ДФИЦ РАН; доцент, Махачкалинский филиал МАДГТУ (МАДИ).

Information about the authors

M.V. Khlopkova - Candidate of Science (Biology), Researcher, Marine Biology Laboratory.
R.M. Barkhalov - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Marine Biology Laboratory, Precaspian Institute of Biological Resources of DFRC RAS; Senior Researcher, Dagestan State Nature Reserve.
K.M. Guseynov - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Marine Biology Laboratory.
A.Sh. Gasanova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Marine Biology Laboratory, Precaspian Institute of Biological Resources of DFRC RAS; Associate Professor, Makhachkala Branch, MARSTU (MADI).

Статья поступила в редакцию 31.03.2023; одобрена после рецензирования 01.07.2023; принята к публикации 30.10.2023.
The article was submitted 31.03.2023; approved after reviewing 01.07.2023; accepted for publication 30.10.2023.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 631.46; 57.044

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-156-163

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТАЛЛИЕМ НА АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ ЦИКЛОВ УГЛЕРОДА, АЗОТА И ФОСФОРА В ПОЧВАХ РАЗНОЙ БУФЕРНОСТИ

**Н.А. Евстегнеева^{1✉}, С.И. Колесников², Т.В. Минникова³, А.Н. Тимошенко⁴,
Н.И. Цепина⁵, К.Ш. Казеев⁶**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ natalja.evstegneeva@yandex.ru ✉

² kolesnikov@sfedu.ru

³ tminnikova@sfedu.ru

⁴ aly9215@mail.ru

⁵ cepinanatalia@yandex.ru

⁶ kamil_kazeev@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние загрязнения таллием на активность ферментов циклов углерода, азота и фосфора в черноземе обыкновенном, бурой лесной почве и серопесках. Таллий вносили в почву в виде оксида (Pt_2O_3) и раствора нитрата таллия ($Pt(NO_3)_3$) в 0,5; 1; 3; 10; 30 условно допустимых концентрациях. Инкубацию проводили в течение 10 сут. В результате исследования установлено, что загрязнение исследуемых почв соединениями таллия приводит к снижению активности ферментов, участвующих в циклах углерода, азота и фосфора. Изменение активности ферментов зависит от химической формы (оксид или нитрат) таллия и концентрации элемента в почве. Наибольшей чувствительностью к загрязнению соединениями таллия обладает активность фосфатазы. Наибольшую устойчивость к загрязнению проявил чернозем обыкновенный, наименьшую – серопески.

Ключевые слова: тяжелые металлы, чернозем обыкновенный, бурая лесная почва, серопески, инвертаза, фосфатаза, уреазы, биотестирование, устойчивость

Для цитирования: Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Цепина Н.И., Казеев К.Ш. Влияние загрязнения таллием на активность ферментов циклов углерода, азота и фосфора в почвах разной буферности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 156–163.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-01041 в Южном федеральном университете.

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

Original article

THE EFFECT OF THALLIUM POLLUTION ON THE ACTIVITY OF ENZYMES OF CARBON, NITROGEN AND PHOSPHORUS CYCLES IN SOILS OF DIFFERENT BUFFERING

N.A. Evstegneeva^{1✉}, S.I. Kolesnikov², T.V. Minnikova³, A.N. Timoshenko⁴,
N.I. Tsepina⁵, K.Sh. Kazeev⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ natalja.evstegneewa@yandex.ru ✉

² kolesnikov@sfedu.ru

³ tminnikova@sfedu.ru

⁴ aly9215@mail.ru

⁵ cepinanatalia@yandex.ru

⁶ kamil_kazeev@mail.ru

Abstract. The influence of thallium (Tl) pollution on the activity of enzymes of carbon, nitrogen and phosphorus cycles in ordinary chernozem, brown forest soil and seropeski was studied. Thallium was introduced into the soil in the form of oxide (Tl₂O₃) and a solution of thallium nitrate (Tl(NO₃)₃) in 0.5, 1, 3, 10, 30 conditionally permissible concentrations. Incubation was carried out for 10 days. As a result of the study, it was found that contamination of the studied soils with Tl compounds leads to a decrease in the activity of enzymes involved in the carbon, nitrogen and phosphorus cycles. The change in enzyme activity depends on the chemical form (oxide or nitrate) of Tl and the concentration of the element in the soil. Phosphatase activity has the greatest sensitivity to contamination by thallium compounds. Ordinary chernozem showed the greatest resistance to thallium contamination, and seropeski showed the least.

Keywords: heavy metals, Haplic Chernozem, Eutric Cambisol, Eutric Arenosol, invertase, phosphatase, urease, biotesting, stability

For citation: Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Tsepina N.I., Kazeev K.Sh. The Effect of Thallium Pollution on the Activity of Enzymes of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Cycles in Soils of Different Buffering. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(4):157-163. (In Russ.).

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-24-01041 at the Southern Federal University.

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

Введение

Масштабы загрязнения почв редкими химическими элементами увеличиваются с каждым годом. Одним из новых приоритетных загрязнителей окружающей среды считается таллий [1]. Согласно ряду исследований, биологическая токсичность таллия выше, чем у свинца, кадмия, ртути и мышьяка [2, 3].

При оценке экотоксичности таллия целесообразно использовать биологические показатели состояния почв, как и в случае с другими химическими загрязнителями [4, 5]. Ранее была установлена высокая экотоксичность таллия для чернозема обыкновенного по количественному содержанию почвенных бактерий, изменению активности почвенных ферментов и показателей интенсивности начального роста и развития семян [6, 7]. Оценка ферментативной активности чернозема обыкновенного при загрязнении таллием проводилась в работе [8]. Исследование по сравнительной оценке устойчивости почв разной буферности к загрязнению таллием по активности ферментов циклов углерода, азота и фосфора проведено впервые.

Цель данного исследования – оценить влияние загрязнения таллием на активность ферментов циклов углерода, азота и фосфора в почвах разной буферности.

Объект и методы исследования

Для модельного исследования были выбраны три типа почв разной буферности (чернозем обыкновенный, бурая лесная кислая почва, песчаные почвы черноземной зоны (серопески)), существенно различающихся по свойствам, определяющим подвижность в почве металлов и металлоидов. Это позволит установить зависимость экотоксичности таллия от свойств почв, определяющих их буферность к загрязнению тяжелыми металлами (реакция среды, гранулометрический состав, содержание органического вещества).

Чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый по классификации World Reference Base for Soil Resources (WRB) [9] – *haplic Chernozem (Loamic)* – отобран в Ботаническом саду ЮФУ, г. Ростов-на-Дону. Почва характеризуется следующими свойствами: содержание гумуса – 2,7 %, pH=7,8, гранулометрический состав – тяжелосуглинистый. Бурая лесная слабонасыщенная почва (*Eutric Cambisol* [9]) отобрана в п. Никель, Майкопский район Республики Адыгеи. Содержание гумуса – 2,8 %, pH=5,8, гранулометрический состав – тяжелосуглинистый. Серопески (*Eutric Arenosol* [9]) отбирали в ст. Верхнекундрюченской Усть-Донецкого района Ростовской области. Почва характеризуется следующими свойствами: содержание гумуса – 1,6 %, pH=6,8, гранулометрический состав – легкосуглинистый.

Поскольку фоновое содержание таллия в почвах различное (чернозем обыкновенный – 0,47 мг/кг, бурая лесная почва – 0,39 мг/кг, серопески – 0,14 мг/кг), степень загрязнения почв в модельном эксперименте выражали в условно-допустимых концентрациях (УДК): 0,5, 1, 3, 10, 30 УДК. Одна УДК принята равной трем фоновым концентрациям элемента в почве, так как для большинства тяжелых металлов негативное воздействие начинает проявляться с 3–4 фоновых концентраций элемента в почве [10, 11]. Контролем служила незагрязненная почва с фоновым содержанием элемента.

Таллий вносили в почву в виде оксида (Tl_2O_3) и раствора нитрата таллия ($Tl(NO_3)_3$). Инкубацию загрязненной почвы в сосудах проводили в течение 10 сут при постоянных температуре (24–25 °C) и влажности воздуха (30 %).

Измерение активности почвенных ферментов рекомендовано в качестве одного из самых чувствительных индикаторов состояния почвы при загрязнении окружающей среды [12]. К тому же активность почвенных ферментов в лабораторных условиях определяется быстрыми и несложными методами [13].

В данном исследовании изучали влияние загрязнения таллием на ферменты класса гидролаз (инвертаза, уреазы, фосфатаза). Гидролазы играют фундаментальную роль в круговороте почвенного углерода (C), азота (N) и фосфора (P) [14, 15]. Активность инвертазы (β -фруктофуранозиды) определяли по количеству глюкозы при гидролизе сахарозы, колориметрически, с использованием реактива Феллинга, мг глюкозы/10 г сухой почвы/24 ч (по Ф.Х. Хазиеву (2005) [16]); уреазы (амидогидролаза) – по количеству аммиака с реактивом Несслера, при гидролизе карбамида, мг NH_4^+ /10 г сухой почвы/24 ч (по Ф.Х. Хазиеву (2005) [16]); фосфатазы – по изменению содержания нитрофенолов с образованием органического фосфора и минеральных субстратов, мкг п-нитрофенола в 1 г почвы за 1 ч (по Tabatabai и Dick, 2002) [17].

Для оценки достоверности влияния загрязнения на исследуемые показатели был использован дисперсионный анализ. В целях удобства интерпретации результатов дисперсионного анализа по его данным рассчитана наименьшая существенная разность (НСР).

Результаты и обсуждение

В результате исследования установлено, что загрязнение исследуемых почв соединениями таллия приводит к снижению активности ферментов класса гидролаз. Изменение активности ферментов зависит от химической формы (оксид или нитрат) таллия и концентрации элемента в почве.

Активность инвертазы представлена на рис. 1. Внесение оксида таллия 0,5 УДК в чернозем обыкновенный ингибирует активность инвертазы на 14 %. При повышении концентрации от 1 до 30 УДК активность фермента снижается на 15–22 % относительно незагрязненной почвы. Внесение (0,5–3 УДК) нитрата таллия в чернозем обыкновенный не вызвало достоверного снижения фермента. Увеличение концентрации нитрата таллия до 10–30 УДК привело к ингибированию инвертазы на 22 и 60 % относительно контроля.

Достоверное снижение активности инвертазы в бурой лесной почве зафиксировано при внесении оксида таллия (1–30 УДК) на 9–36 % ниже контрольных значений. Внесение нитрата таллия (0,5 УДК) не вызвало снижения инвертазы, значения показателя снижались, начиная с внесения 1 УДК таллия. Наибольшая токсичность зафиксирована при внесении 30 УДК таллия – на 34 % ниже контроля.

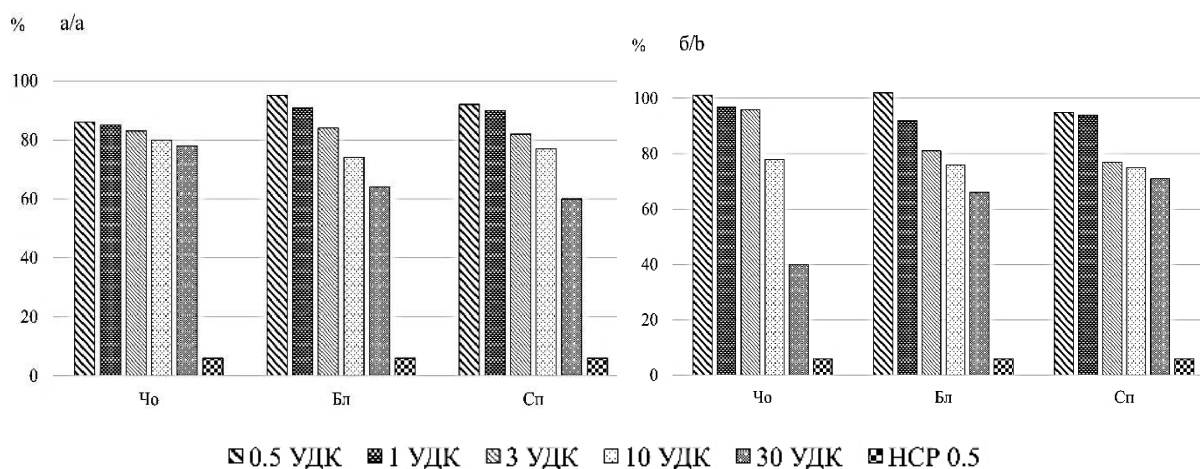


Рис. 1. Изменение активности инвертазы при загрязнении чернозема обыкновенного (Чо), бурой лесной почвы (Бл) и серопесков (Сп), % от контроля: а – оксид таллия; б – нитрат таллия / Fig.1. Change in invertase activity during contamination, % of control: a - thallium oxide; b - thallium nitrate

Оксид таллия оказывал токсическое действие на активность инвертазы в серопесках, начиная уже с 0,5 УДК, снизив показатель на 8 % относительно контроля. Увеличение концентрации оксида таллия на 1–30 УДК снизило показатель на 10–40 % соответственно.

Изменение активности уреазы в исследуемых почвах представлено на рис. 2. В черноземе обыкновенном только при 30 УДК оксида таллия установлено снижение активности уреазы на 11 % относительно контроля. Содержание нитрата таллия в дозах 0,5, 1 и 3 УДК достоверно не влияет на активность уреазы в черноземе обыкновенном. Наиболее токсичной оказалась доза 30 УДК, активность фермента снизилась на 12 % относительно контроля.

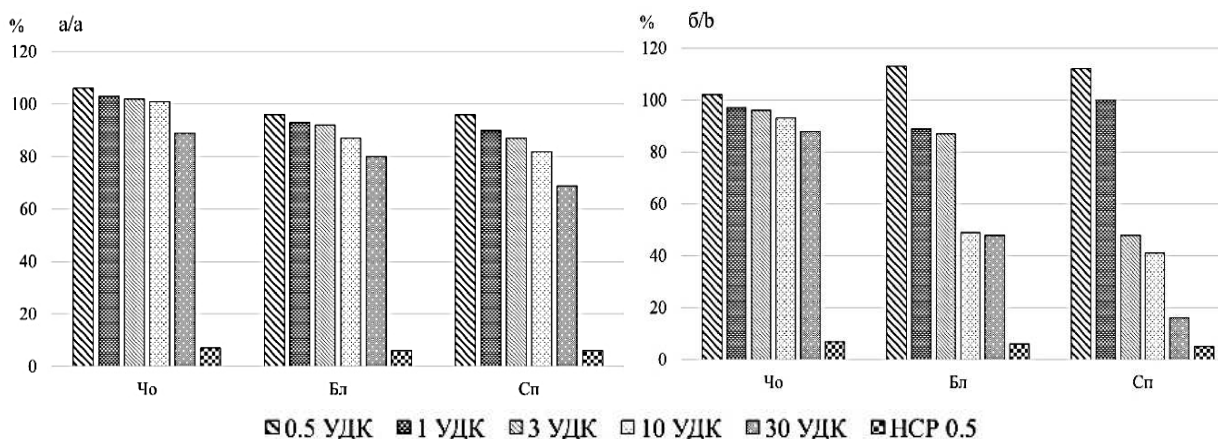


Рис. 2. Изменение активности уреазы при загрязнении чернозема обыкновенного (Чо), бурой лесной почвы (Бл) и серопесков (Сп), % от контроля: а – оксид таллия; б – нитрат таллия / Fig. 2. Change in urease activity during contamination, % of control: a - thallium oxide; b - thallium nitrate

В бурой лесной почве токсический эффект начинает проявляться после внесения 1 УДК оксида таллия, показатель снижается на 7 % относительно незагрязненного образца. Повышение концентрации оксида до 10–30 УДК приводит к снижению активности уреазы на 13–20 %. Внесение 0,5 УДК нитрата таллия привело к стимулирующему эффекту, активность уреазы бурой лесной почвы увеличилась на 13 % относительно контрольного образца. Начиная с внесения 1 УДК нитрата, зафиксировано ингибирование показателя на 11 %. Наибольший токсический эффект (52 % ниже контроля) отмечен при внесении 30 УДК нитрата.

Оксид таллия при внесении 1–30 УДК вызывает достоверное снижение активности уреазы в серопесках на 10–31 % относительно контроля. Нитрат таллия в размере 0,5–1 УДК не снижает активности уреазы, а внесение 3 УДК нитрата таллия снижает показатель на 52 % относительно контроля. Наибольшее токсическое действие зафиксировано при внесении нитрата таллия в размере 30 УДК.

Влияние загрязнения таллием на активность фосфатазы представлено на рис. 3. В черноземе обыкновенном оксид таллия при дозах от 1 до 30 УДК достоверно снижал активность фермента на 10–20 % относительно контроля. Нитрат таллия проявил токсичность уже в минимальной дозе 0,5 УДК и ингибировал активность почвы на 23 %. При повышении концентрации нитрата таллия от 1 до 30 УДК ингибирование активности фосфатазы составило 47–84 % относительно контроля.

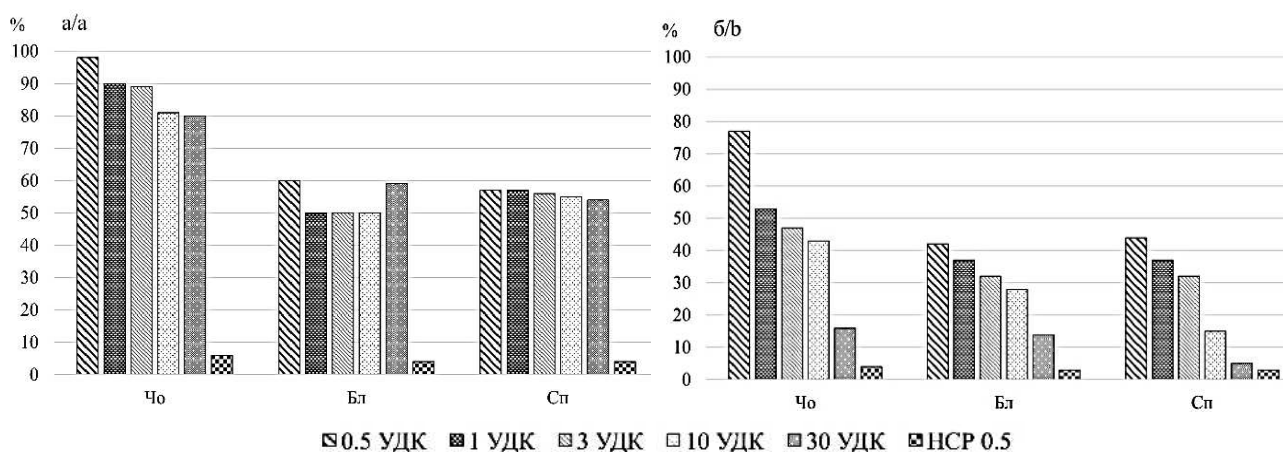


Рис. 3. Изменение активности фосфатазы при загрязнении чернозема обыкновенного (Чо), бурой лесной почвы (Бл) и серопесков (Сп), % от контроля: а – оксид таллия; б – нитрат таллия / Fig. 3. Change in phosphatase activity during contamination, % of control: a - thallium oxide; b - thallium nitrate

Внесение оксида таллия в бурую лесную почву вызвало снижение активности фосфатазы во всех исследуемых концентрациях на 40–41 %. Нитрат таллия проявил большую токсичность, внесение уже 0,5 УДК привело к снижению активности фермента на 58 % относительно контроля. Увеличение концентрации соединения от 1 до 30 УДК привело к ингибированию фосфатазы на 63–86 %.

Оксид таллия примерно в равной степени снизил активность фосфатазы серопесков при внесении во всех исследуемых концентрациях на 43–46 % относительно незагрязненной почвы. Внесение нитрата таллия в размере 0,5–1 УДК снизило активность фермента на 56–63 % относительно контроля. 10–30 УДК нитрата таллия проявили наибольший токсический эффект, активность фосфатазы снизилась на 85–95 % относительно контроля.

Установлено, что загрязнение исследуемых почв соединениями таллия приводит к снижению активности ферментов класса гидролаз.

По-видимому, причины ингибирования ферментов после внесения таллия связаны со снижением проницаемости биологических мембран [18].

Ферментативная активность почв при их химическом загрязнении, наряду с микробиологическими свойствами, является чувствительным биологическим индикатором [19]. О чувствительности показателя судили по степени снижения его значений в вариантах с загрязнением по сравнению с контролем (таблица).

По результатам исследования обнаружено, что наибольшей чувствительностью к загрязнению соединениями таллия обладает активность фосфатазы. Ранее было показано, что фосфатаза является чувствительным показателем в случае загрязнения почв широким спектром тяжелых металлов [20, 21], а также наряду с дегидрогеназами и микробной биомассой считается маркером загрязнения почв тяжелыми металлами [22, 23].

Проведено ранжирование почвы по чувствительности к загрязнению оксидом и нитратом таллия по ферментативной активности. Полученные результаты представлены в виде следующих рядов: при загрязнении оксидом: чернозем обыкновенный (90) > серопески (75) > бурая лесная почва (73); при загрязнении нитратом: чернозем обыкновенный (75) > бурая лесная почва (64) > серопески (57). Как видно из построенных рядов, наименьшую чувствительность к загрязнению таллием проявил чернозем обыкновенный. Вероятно, тяжелый гранулометрический состав,

нейтральная реакция среды (рН 7,8) и высокое содержание гумуса (2,7 %) обусловили меньшую подвижность таллия в черноземе обыкновенном. Более сильная чувствительность бурой лесной почвы к загрязнению соединениями таллия вызвана кислой реакцией среды (рН 5,8). А низкое содержание гумуса (1,6 %) и легкий гранулометрический состав серопесков обусловили их высокую чувствительность к загрязнению.

Степень снижения ферментативной активности по чувствительности к загрязнению оксидом и нитратом таллия, % от контроля / The degree of decrease in enzymatic activity in sensitivity to contamination by oxide and nitrate thallium, % of control

Фермент	Чернозем обыкновенный		Бурая лесная почва		Серопески	
	Оксид	Нитрат	Оксид	Нитрат	Оксид	Нитрат
Инвертаза	83	82	81	83	80	82
Уреаза	100	95	85	77	90	63
Фосфатаза	87	47	54	31	56	27

Заключение

Установлено, что загрязнение исследуемых почв соединениями таллия приводит к снижению активности исследованных ферментов. Изменение активности ферментов зависит от химической формы (оксид или нитрат) таллия и концентрации элемента в почве. Наибольшей чувствительностью к загрязнению соединениями таллия обладает активность фосфатазы. Наибольшую устойчивость к загрязнению таллием проявил чернозем обыкновенный, наименьшую – серопески. Это определяется эколого-генетическими свойствами исследованных почв, обуславливающими степень буферности к загрязнению таллием (реакция среды, гранулометрический состав, содержание органического вещества). Результаты исследования целесообразно использовать при биодиагностике состояния почв разной буферности, загрязненных таллием.

Список источников

1. Касимов Н.С., Власов Д.В. Технофильность химических элементов в начале XXI в. // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2012. № 1. С. 15–22.
2. Wang Y., Zhou Y., Wei X., Chen Y., Beiyuan J., She J., Wang L., Liu J., Liu Y., Wang J. Effects of thallium exposure on intestinal microbial community and organ functions in zebrafish (*Danio rerio*) // Elementa: Science of the Anthropocene. 2021. Vol. 9. P. 00092. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00092>.
3. Kolesnikov S., Minnikova T., Kazeev K., Akimenko Y., Evstegneeva N. Assessment of the Ecotoxicity of Pollution by Potentially Toxic Elements by Biological Indicators of Haplic Chernozem of Southern Russia (Rostov region) // Water, Air, & Soil Pollution. 2022. Vol. 233. P. 18. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05496-3>.
4. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Sudina L., Minnikova T.V., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Silver ecotoxicity estimation by the soil state biological indicators // Applied and Environmental Soil Science. 2020. Vol. 2020. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/1207210>.
5. Yang C., Chen Y., Li C., Chang X., Xie C. Distribution of natural and anthropogenic thallium in the soils in an industrial pyrite slag disposing area // Science of The Total Environment. 2005. Vol. 341(1-3). P. 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.024>.
6. Kolesnikov S., Minnikova T., Tsepina N., Evstegneeva N., Timoshenko A. Assessment of the Ecotoxicity of Ag, Bi, Te and Tl According to the Biological Indicators of Haplic Chernozem // Applied Sciences. 2022. Vol. 12(24). P. 12854. <https://doi.org/10.3390/app122412854>.
7. Тимошенко А.Н., Колесников С.И., Евстегнеева Н.А., Минникова Т.В., Цепина Н.И., Казеев К.Ш. Влияние загрязнения чернозема обыкновенного Ag, Bi, Te, Tl на прорастание и интенсивность начального роста озимой пшеницы // Агротех. вестн. 2022. № 6. С. 83–89. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-6-016>.
8. Minnikova T., Kolesnikov S., Evstegneeva N., Timoshenko A., Tsepina N. Estimation of the Enzymatic Activity of Haplic Chernozem under Contamination with Oxides and Nitrates of Ag, Bi, Te and Tl // Agronomy. 2022. Vol. 12(9). P. 2183. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092183>.
9. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna, Austria, 2022. 236 p.
10. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжелыми металлами // Почвоведение. 2002. № 12. 1509–1514.
11. Колесников С.И., Спивакова Н.А., Казеев К.Ш. Влияние модельного загрязнения Cr, Cu, Ni, Pb на биологические свойства почв сухих степей и полупустынь юга России // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1094–1101.
12. Wahsha M., Nadimi-Goki M., Fornasier F., Al-Jawasreh R., Hussein E. I., Bini C. Microbial enzymes as an early warning management tool for monitoring mining site soil // Catena. 2017. Vol. 148. P. 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.021>.

13. Lee S.H., Kim E.Y., Hyun S., Kim J.G. Metal availability in heavy metal-contaminated open burning and open detonation soil: assessment using soil enzymes, earthworms, and chemical extractions // *J. of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 170, № 1. P. 382–388. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.088>.
14. Хазиев Ф.Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // *Вестн. Академии наук Республики Башкортостан*. 2015. Т. 20, № 2 (78). С. 14–24.
15. Yang J., Yang F., Yang Y., Xing G., Deng C., Shen Y., Luo L., Li B., Yuan H. A proposal of “core enzyme” bioindicator in long-term Pb-Zn ore pollution areas based on topsoil property analysis // *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 213. P. 760–769. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.030>.
16. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
17. Tabatabai M.A., Dick W.A. Enzymes in soil: research and developments in measuring activities // *Enzymes in the environment: Activity, ecology, and applications*. N.Y.: Marcel Dekker, 2002. P. 567–596.
18. Mazur R., Sadowska M., Kowalewska L., Abratowska A., Kalaji H.M., Mostowska A., Garstka M., Krasnodębska-Ostrega B. Overlapping toxic effect of long-term thallium exposure on white mustard (*Sinapis alba* L.) photosynthetic activity // *BMC Plant Biol*. 2016. Vol. 16. P. 191. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0883-4>.
19. Терехова В.А. Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния (обзор) // *Почвоведение*. 2022. № 5. С. 586–599. <https://doi.org/10.1134/S106422932205009X>.
20. Gong W.-J., Niu Z.-F., Wang X.-R., Zhao H.-P. How the Soil Microbial Communities and Activities Respond to Long-Term Heavy Metal Contamination in Electroplating Contaminated Site // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, № 2. P. 362. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020362>.
21. Tyler G. Heavy metal pollution, phosphatase activity, and mineralization of organic phosphorus in forest soils // *Soil Biol. Biochem*. 1976. Vol. 8. P. 327–332.
22. Vaidya B.P., Hagmann D.F., Balacco J., Passchier S., Krumins J.A., Goodey N.M. Plants mitigate restrictions to phosphatase activity in metal contaminated soils // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 265. P. 114801. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114801>.
23. Pan J., Yu L. Effects of Cd or/and Pb on soil enzyme activities and microbial community structure // *Ecological Engineering*. 2011. Vol. 37. P. 1889–1894. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.07.002>.

References

1. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Technophilia of chemical elements in the beginning of the 21st century. *Vestn. Moskovskogo un-ta. Seriya 5: Geografiya = Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*. 2012;(1):15-22. (In Russ.).
2. Wang Y., Zhou Y., Wei X., Chen Y., Beiyuan J., She J., Wang L., Liu J., Liu Y., Wang J. Effects of thallium exposure on intestinal microbial community and organ functions in zebrafish (*Danio rerio*). *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2021;9:00092, <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00092>.
3. Kolesnikov S., Minnikova T., Kazeev K., Akimenko Y., Evstegneeva N. Assessment of the Ecotoxicity of Pollution by Potentially Toxic Elements by Biological Indicators of Haplic Chernozem of Southern Russia (Rostov region). *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022;233:18, <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05496-3>.
4. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Sudina L., Minnikova T.V., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Silver ecotoxicity estimation by the soil state biological indicators. *Applied and Environmental Soil Science*. 2020;2020:1-9, <https://doi.org/10.1155/2020/1207210>.
5. Yang C., Chen Y., Li C., Chang X., Xie C. Distribution of natural and anthropogenic thallium in the soils in an industrial pyrite slag disposing area. *Science of the Total Environment*. 2005;341(1-3):159-172, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.024>.
6. Kolesnikov S., Minnikova T., Tsepina N., Evstegneeva N., Timoshenko A. Assessment of the Ecotoxicity of Ag, Bi, Te and Tl According to the Biological Indicators of Haplic Chernozem. *Applied Sciences*. 2022;12(24):12854, <https://doi.org/10.3390/app122412854>.
7. Timoshenko A.N., Kolesnikov S.I., Evstegneeva N.A., Minnikova T.V., Tsepina N.I., Kazeev K.Sh. Influence of common chernozem pollution with Ag, Bi, Te, Tl on germination and initial growth of winter wheat. *Agrokhim. vestn. = Agrochemical Herald*. 2022;(6):83-89, <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-6-016>. (In Russ.).
8. Minnikova T., Kolesnikov S., Evstegneeva N., Timoshenko A., Tsepina N. Estimation of the Enzymatic Activity of Haplic Chernozem under Contamination with Oxides and Nitrates of Ag, Bi, Te and Tl. *Agronomy*. 2022;12(9):2183, <https://doi.org/10.3390/agronomy12092183>.
9. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th ed. Vienna, Austria, 2022. 236 p.
10. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Valkov V.F. Ecological functions of soils and the effect of contamination with heavy metals. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2002;(12):1509-1514. (In Russ.).
11. Kolesnikov S.I., Spivakova N.A., Kazeev K.Sh. The effect of model soil contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb on the biological properties of soils in the dry steppe and semidesert regions of Southern Russia. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2011;(9):1094-1101. (In Russ.).

12. Wahsha M., Nadimi-Goki M., Fornasier F., Al-Jawasreh R., Hussein E. I., Bini C. Microbial enzymes as an early warning management tool for monitoring mining site soil. *Catena*. 2017;148:40-45, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.021>.

13. Lee S.H., Kim E.Y., Hyun S., Kim J.G. Metal availability in heavy metal-contaminated open burning and open detonation soil: assessment using soil enzymes, earthworms, and chemical extractions. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;170(1):382-388, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.088>.

14. Khaziev F.Kh. Functional role of enzymes in soil processes. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan = The Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2015;20(2):14-24. (In Russ.).

15. Yang J., Yang F., Yang Y., Xing G., Deng C., Shen Y., Luo L., Li B., Yuan H. A proposal of “core enzyme” bioindicator in long-term Pb-Zn ore pollution areas based on topsoil property analysis. *Environmental Pollution*. 2016;213:760-769, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.030>.

16. Khaziev F.Kh. *Methods of soil enzymology*. Moscow: Nauka Publ.; 2005. 252 p. (In Russ.).

17. Tabatabai M.A., Dick W.A. Enzymes in soil: research and developments in measuring activities. *Enzymes in the environment: Activity, ecology, and applications*. New York: Marcel Dekker Publ.; 2002:567-596.

18. Mazur R., Sadowska M., Kowalewska Ł., Abratowska A., Kalaji H.M., Mostowska A., Garstka M., Krasnodębska-Ostrega B. Overlapping toxic effect of long-term thallium exposure on white mustard (*Sinapis alba* L.) photosynthetic activity. *BMC Plant Biol*. 2016;16:191, <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0883-4>.

19. Terekhova V.A. Biotesting of soil ecotoxicity in case of chemical contamination: modern approaches to integration for environmental assessment (a review). *Eurasian Soil Science*. 2022;55(5):601-612, <https://doi.org/10.1134/S106422932205009X>.

20. Gong W.-J., Niu Z.-F., Wang X.-R., Zhao H.-P. How the Soil Microbial Communities and Activities Respond to Long-Term Heavy Metal Contamination in Electroplating Contaminated Site. *Microorganisms*. 2021;9(2):362, <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020362>.

21. Tyler G. Heavy metal pollution, phosphatase activity, and mineralization of organic phosphorus in forest soils. *Soil Biol. Biochem*. 1976;8:327-332.

22. Vaidya B.P., Hagmann D.F., Balacco J., Passchier S., Krumins J.A., Goodey N.M. Plants mitigate restrictions to phosphatase activity in metal contaminated soils. *Environmental Pollution*. 2020;265:114801, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114801>.

23. Pan J., Yu L. Effects of Cd or/and Pb on soil enzyme activities and microbial community structure. *Ecological Engineering*. 2011;37:1889-1894, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.07.002>.

Информация об авторах

Наталья Андреевна Евстегнеева – аспирант, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Сергей Ильич Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Татьяна Владимировна Минникова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Алена Николаевна Тимошенко – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Наталья Игоревна Цепина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Камиль Шагидуллович Казеев – доктор географических наук, директор Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

Natalia A. Evstegneeva - Postgraduate Student, Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnologies.

Sergey I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agriculture), Professor, Head of Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnologies.

Tatiana V. Minnikova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnologies.

Alena N. Timoshenko - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnologies.

Natalia I. Tsepina - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Academy of Biology and Biotechnologies.

Kamil Sh. Kazeev - Doctor of Science (Geography), Director of the Academy of Biology and Biotechnologies.

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 01.08.2023; принята к публикации 30.10.2023.

The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 01.08.2023; accepted for publication 30.10.2023.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

doi: 10.18522/1026-2237-2023-4-164-166

АЛЕКСАНДР ОВАНЕСОВИЧ ВАТУЛЯН (70 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

ALEXANDER OVANESOVICH VATULYAN (70th BIRTHDAY)



8 октября 2023 г. исполнилось 70 лет заслуженному деятелю науки РФ, доктору физико-математических наук, профессору, заведующему кафедрой теории упругости Южного федерального университета Александру Ованесовичу Ватулян – известному в нашей стране и за рубежом механику, крупному специалисту в области теории обратных задач механики, члену Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике, Совета РАН по механике деформируемого твердого тела. Им опубликовано свыше 550 научных работ, в том числе 8 монографий, подготовлено 3 доктора и 32 кандидата наук.

Александр Ованесович в 1975 г. окончил с отличием механико-математический факультет Ростовского государственного университета по специальности «механика» и поступил в аспирантуру мехмата РГУ к своему научному руководителю В.А. Бабешко (ныне академик РАН). В декабре 1978 г. прошла защита кандидатской диссертации «Смешанные статические и динамические задачи теории упругости для ортотропного слоя», которая показала, что вырос но-

вый талантливый ученый. Ранее исследователи обращались к контактным задачам только для изотропных сред. Александр Ованесович первым рассмотрел случаи анизотропных слоев и успешно «распутал» кривые нулей сложных пространственных дисперсионных уравнений. Первым доказал разрешимость и единственность решений контактных задач для анизотропных слоистых структур.

Исследование гораздо более сложных задач для анизотропных упругих тел произвольной формы, их сведение к системам граничных интегральных уравнений и их изучение базировались

на построении фундаментальных и сингулярных решений для сферически несимметричных операторов. Это привело к защите в 1993 г. докторской диссертации «Метод граничных интегральных уравнений в динамических задачах анизотропной теории упругости и электроупругости» в только созданном докторском диссертационном совете.

Дальнейшие исследования А.О. Ватульяна посвящены обратным задачам механики сплошной среды. Здесь он выступает как блестящий механик и математик. В многочисленных публикациях по геометрическим и коэффициентным обратным задачам и их приложениям к проблемам механики, биомеханики, электроупругости, в монографиях «Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела» (ФМ, Москва, 2007 г.) и «Коэффициентные обратные задачи механики» (ФМ, Москва, 2019 г.) изложена современная теория обратных, корректных и некорректных задач, существующие методы их регуляризации, разработанные им новые подходы к решению этих задач. Теория дополнена результатами вычислительных экспериментов, что делает материал особенно наглядным и доступным. Эти монографии смело можно назвать энциклопедическими.

С сентября 1978 г. по сегодняшний день Александр Ованесович работает на кафедре теории упругости, пройдя путь от ассистента до заведующего кафедрой (с 2001 г.).

Ещё в 1973 г., будучи студентом третьего курса, он начал работать под руководством Владимира Андреевича Бабешко, который увидел в талантливом студенте черты настоящего ученого. В дальнейшем на формирование А.О. Ватульяна как ученого и педагога оказал существенное влияние сам руководитель научной школы механиков, академик АН СССР Иосиф Израевич Ворович. Он стал научным консультантом Александра Ованесовича по его докторской диссертации.

Сейчас ростовскую научную школу механики И.И. Воровича возглавляет Александр Ованесович, продолжая дело её основателя, разрабатывая новые направления, совершенствуя учебные программы, осуществляя подготовку молодых специалистов. Он является руководителем в ней собственной научной школы. Свидетельствами научных достижений его школы являются не только докторские и кандидатские диссертации, защищенные под его руководством, но и завоеванные гранты молодых ученых.

Будучи активно работающим ученым, руководителем научных грантов РФФИ и РФФИ, проектов Министерства науки и образования РФ, Александр Ованесович уделяет много времени педагогической и научно-организационной деятельности. Он – председатель диссертационного совета по механике в ЮФУ, член ещё двух диссертационных советов ЮФУ, по совместительству с 2012 г. заведует отделом дифференциальных уравнений Южного математического института ВЦ РАН (г. Владикавказ), в 1995–1997 гг. по совместительству возглавлял кафедру высшей математики ДГТУ, с 1989 по 1991 г. был заместителем декана мехмата РГУ по научной работе.

Ещё одним научно-организационным достижением Александра Ованесовича являются научные конференции: Всероссийская с международным участием «Современные проблемы механики сплошной среды» (которую он возглавляет с 2001 г.) и Всероссийская школа молодых ученых «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете», в которой он руководит программным комитетом.

Профессор А.О. Ватульян – один из ведущих лекторов Института математики, механики и компьютерных наук. Им разработаны оригинальные курсы: «Обратные задачи механики», «Методы идентификации динамических систем», «Теория случайных процессов в механике», «Введение в биомеханику». Признанием его педагогических заслуг являются не только ученые звания доцента и профессора, звание «Почетный работник ВПО РФ», но и получение профессорских грантов ISSEP (1997, 1998, 2000), присуждаемых не только по формальным показателям, но и по результатам независимого анкетирования студентов.

Александр Ованесович – активный популяризатор математики и механики. Он читал лекции учителям и школьникам Ростовской области и Юга России. В 1998 г. им опубликованы научно-популярные статьи «Математические модели и обратные задачи» (СОЖ. 1998. № 11), в 1999 г. – «Кватернионы» (СОЖ. 1999. № 5). Приведем цитату из статьи 1998 г., она характеризует не только стиль автора, но и само научное направление А.О. Ватульяна: «Обратные задачи математической физики – бурно развивающаяся в настоящее время часть современной математики, сформировавшаяся в основном в последние 35–40 лет, хотя первые работы относятся к 30-м годам XX века. Все большая часть математических моделей приобретает стройность и достоверность как раз благодаря достижениям теории обратных задач».

Приятно отметить, что свой 70-летний юбилей Александр Ованесович встретил в расцвете творческих сил и как активно работающий ученый (в 2023 г. ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки РФ»), и как заведующий кафедрой теории упругости. Он член редколлегии пяти авторитетных научных журналов («Известия РАН. Механика твердого тела», «Российский журнал биомеханики», «Владикавказский математический журнал», «Известия Саратовского университета. Математика и механика», «Экологический вестник ЧЭС»). При этом у него находится время на настольный теннис и шахматы, коллекционирование марок (его особая гордость – марки, посвященные математике и механике).

Об искусстве общения Александра Ованесовича с друзьями, коллегами, учениками и студентами следует сказать особо. Он всегда душа компании – тамада на банкетах научных конференций, защит диссертаций, юбилеях коллег, неисчерпаемый источник анекдотов и шуток. Александр Ованесович – отзывчивый и надежный товарищ, готовый всегда прийти на помощь в трудную минуту, бережно и уважительно относящийся к своим старшим коллегам, поддерживающий молодых исследователей.

Александр Ованесович – потомственный механик. Его отец – Аванес Христофорович Ватуйлян, выпускник физмата РГУ, был первым дипломником Иосифа Израилевича Воровича. Он свыше 50 лет проработал доцентом кафедры теоретической механики, сделал её одной из лучших в Новочеркасском политехническом институте.

Семья Александра Ованесовича наполнена духом служения науке и образованию. Его супруга Татьяна Александровна – ответственный секретарь журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки», старшая дочь Карина Александровна – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры теории упругости, младшая дочь Маргарита Александровна – культуролог, специалист в области корпоративного образования. Подрастают замечательные внуки, любимицы Александра Ованесовича. Будем надеяться, что и они вольются в научно-образовательную династию семьи.

Известный ученый, занимающий свое достойное место в плеяде механиков Ростовского, а ныне Южного федерального университета, и смело можно сказать, страны и мира, Александр Ованесович остается скромным и деликатным человеком.

Свое 70-летие он сумел превратить в тёплый праздник для своих друзей и коллег, избежав длительных зачитываний юбилейных адресов и произнесения хвалебных речей в свою честь, которых он, несомненно, заслуживает как выдающийся ученый и педагог, беззаветно служащий науке и своей стране.

Редакция журнала, хорошо знающая юбиляра, его семью, членов кафедры, поздравляет их и отмечает, что личность юбиляра настолько многогранна, интересна и значительна, что на страницах одного научного журнала её раскрыть не удастся. Но впереди ещё есть юбилеи! Желаем их достойно встретить в полном творческом и физическом здравии.

*В.А. Бабешко, Л.С. Ворович, И.П. Гетман,
Я.М. Ерусалимский, М.И. Карякин, А.Г. Кусраев*

Редколлегия и редакция журнала поздравляют Александра Ованесовича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья и благополучия, новых творческих успехов, благодарных учеников и последователей!

**Указатель материалов, опубликованных в журнале
«Известия высших учебных заведений.
Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2023 г.**

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.</i> О резонансах академика И.И. Воровича в контактных задачах с деформируемым штампом в сейсмологии.....	4
<i>Бештоков М.Х.</i> Разностная схема повышенного порядка аппроксимации для уравнения Аллера с переменными коэффициентами.....	4
<i>Ватульян А.О., Варченко А.А., Юров В.О.</i> Исследование коэффициентных обратных задач с учетом реологии для функционально-градиентных стержней.....	3
<i>Галаев С.В.</i> О почти квазисасакиевых параконтактных структурах на распределениях субримановых многообразий.....	1
<i>Жуков М.Ю., Цывенкова О.А.</i> Стационарная вращательно-симметричная конвекция при изотахофорезе в круговой цилиндрической области с недеформируемой свободной непроницаемой боковой поверхностью.....	4
<i>Зехцер В.О., Костоглотов А.А.</i> Синтез квазиоптимальных законов управления на основе принципа декомпозиции и редукции задачи Лагранжа к изопериметрической в условиях неопределенности.....	3
<i>Зехцер В.О., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Агапов А.А.</i> Метод синтеза нелинейных квазиоптимальных законов управления многомерными системами на основе условия максимума функции обобщенной мощности и анализа пучка квадратичных форм.....	4
<i>Карякин М.И., Егорова С.А.</i> Вычисление коэффициентов определяющих соотношений нелинейно-упругих материалов с использованием эволюционных алгоритмов.....	2
<i>Кауров П.В.</i> Определение прогибов физически нелинейной балки на упругом основании.....	1
<i>Костоглотов А.А., Пеньков А.С., Лазаренко С.В.</i> Квазиоптимальные законы управления на основе редукции экстремальных задач в динамических алгоритмах оценки положения маневрирующих объектов..	3
<i>Маннаа А.С., Муратова Г.В.</i> Разработка алгоритма построения референтных линий и углов для коленных суставов на рентгеновских снимках.....	2
<i>Полякова Н.М., Цветкова В.И.</i> Численное исследование двумерного симметричного течения несжимаемой жидкости с зависящей от координат вязкостью между частично неровными плоскостями..	3
<i>Попов В.А.</i> Аналитическое продолжение римановых аналитических многообразий малой размерности ...	2
<i>Рошаль Д.С., Аззаг К., Федоренко К.К., Рошаль С.Б., Багдигьян С.</i> Проявление сферической геометрии в монослоях клеток.....	1
<i>Салманов В.И.</i> Дифференцируемость функционала и необходимое условие для решения задачи оптимального управления с интегральным критерием качества по всей области для нелинейного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым.....	2
<i>Самсонов И.К., Сумбатян М.А.</i> О влиянии винглетов на аэродинамические свойства тонкого крыла.....	2
<i>Сумбатян М.А., Закарян Р.М.</i> Зарождение вихреобразования на границе кругового цилиндра при его обтекании потоком вязкой жидкости.....	4
<i>Хопёрский А.Н., Конев Р.В.</i> О суммировании $3j$ -символов Вигнера.....	1
<i>Чебаков М.И., Колосова Е.М.</i> Взаимодействие жесткого штампа и пороупругой полосы, закрепленной на пороупругой полуплоскости.....	2
<i>Шармин Д.В., Шармина Т.Н., Шармин В.Г.</i> Тензор кривизны n -поверхности и ее сферического образа в E^{n+k}	1
<i>Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н.</i> Геометрические характеристики нанокапли. Ранжирование энергии капли.....	2
<i>Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н.</i> Высота микро- и нанокапли в модели, учитывающей толщину поверхностного слоя капли.....	4

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Bashirova A.A.</i> Statistical Analysis of Convective Processes Over the Absheron Peninsula.....	1
<i>Аджиева А.А., Куповых Г.В., Керефова З.М.</i> Результаты анализа грозовой деятельности на территории Республики Северная Осетия – Алания.....	4

Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Куповых Г. В., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В., Ашабокова М.Б. Метод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами, с учетом вероятности их появления	3
Бабич О.О., Рада А.О., Куликова Ю.В., Сухих С.А. Изучение уровня эвтрофикации прибрежных вод Гданьского залива Балтийского моря с использованием данных дистанционного зондирования Земли	1
Баранникова Н.Н., Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Альмаджмаи И.А.А., Эрешова А., Чернявская Е.В. Гидрохимические особенности озёр Большое и Малое Турали по результатам исследований в 2018 и 2021 годах	3
Бешенцев А.Н., Борисова Т.А., Лубсанов А.А., Будаева Д.Г., Петров С.А. Декомпозиция ретроспективных топографических карт для послылойной оценки типов регионального природопользования	3
Бурдуковский М.Л., Перепелкина П.А., Киселева И.В. Агрофизические свойства и степень гумусированности аллювиальной серогумусовой почвы (Приморский край)	1
Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Трубник Р.Г., Талпа Б.В., Ковалев Е.А. Концентрация и эмиссия метана и сероводорода в озере Баскунчак, ручье балки Улан-Благ и дегазирующих источниках подземных вод в весенний период	3
Гацаева Л.С. Геоэкологические проблемы излива термальных вод скважины 9-Т Каргалинская	4
Гибков Е.В., Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Решетняк В.Н. Техногенные шахтные воды Восточного Донбасса и их влияние на микроэлементный состав речных вод и донных отложений	4
Даукаев А.А. Нефтегазовая отрасль Чеченской Республики: история и современность (к 130-летию промышленной добычи нефти)	3
Дегтярева Т.В. Особенности трансформации микроэлементного состава почв города Ставрополя под влиянием урбогенеза	1
Ергина Е.И., Безуглова О.С. Сравнительная характеристика литохимических особенностей черноземов северного Приазовья и Крыма	2
Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Табуницкий В.А., Петлюкова Е.А. Почвенное разнообразие территории Крымского полуострова	1
Забураева Х.Ш., Алиева Х.А.-В., Шаипова А.А. Природные туристско-рекреационные ресурсы Северо-Восточного Кавказа	3
Иошпа А.Р., Аль-Хулайфави И.А.Д. Анализ грозовой активности на территории Ирака	2
Ипполитова Н.А. Пространственная динамика численности населения малых городов сибирских регионов ..	1
Калинин А.А., Пономаренко Н.В., Матвейкина Ж.В. Мониторинг состояния земель сельскохозяйственного назначения Ростовской области и эффективности их использования	1
Каранин А.В., Беликова М.Ю. Оценка влияния магнитных и гравитационных аномалий на формирование грозовых пожаров на территории Республики Алтай	1
Каранин А.В., Кочеева Н.А., Беликова М.Ю., Какорин В.А. Энергия и суточный ход молниевой активности в локациях пожаров от гроз на территории Республики Алтай	4
Крыленко В.В., Крыленко М.В. Особенности современного строения подводной аккумулятивной формы банка Еленина	2
Лиев К.Б., Куцев С.А. Градовые процессы различных типов в центральной части Северного Кавказа	4
Максимова Н.Б., Морковкин Г.Г., Ненашева Г.И. Динамика сроков наступления вегетационного периода по природно-почвенным зонам Алтайского края за 1955–2020 годы	4
Марданов И.И. Экогеографические предпосылки и проблемы развития туризма в высокогорных территориях	2
Матюгин В.А., Безуглова О.С. Влияние гуминовых препаратов на азотное питание озимой пшеницы и уреазную активность чернозема обыкновенного карбонатного	3
Мирзоева Н.Ю., Соловьёва О.В., Дорошенко Ю.В., Тихонова Е.А., Бурдиян Н.В. Оценка качества воды и донных отложений Северо-Крымского канала перед запуском основного потока воды по содержанию углеводов и некоторым микробиологическим показателям (весна 2022 г., полуостров Крым)	4
Плуталова Т.Г., Чернова Е.О. Динамика урожайности зерновых культур Алтайского края в условиях изменения климата	1
Радионон А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 3: Нестационарные решения	1
Радионон А.А., Тимченко В.Ю. О сезонной изменчивости характеристик тропопаузы в предгорных районах Северного Кавказа по данным ERA-5 (Copernicus) и MERRA-2 (NASA)	3
Рыскалиева Д.К., Есенаманова М.С., Сырлыбеккызы С., Сангаджиева Л.Х. Анализ накопления подвижной серы в почве города Атырау	2
Сальник Н.В., Иволгина В.А., Горбов С.Н., Козырев Д.А. Распределение тяжелых металлов и их миграция в системе почва - растение на примере парка Н. Островского города Ростова-на-Дону	4

Санжеев Э.Д., Намдаков М.Б. Рекреационное лесопользование в регионах Северной Азии (на примере Республики Бурятия)	2
Скрипка Г.И., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Глинка В.В. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для выявления мест размещения отходов в водоохраных зонах	3
Стекольников Г.А., Курашова И.И. Оценка потенциала земельных ресурсов сельскохозяйственного предприятия	2
Сухоносенко Д.С. Исследование характера загрязнения почвы цинком и кадмием вдоль автомобильных дорог города Волжского	2
Сытник Н.А. Влияние опасных гидрометеорологических явлений на эксплуатацию транспортного перехода через Керченский пролив.....	4
Сытник Н.А. Химико-токсикологическая характеристика и санитарно-бактериологическое состояние морской среды Керченского пролива и предпроливной зоны Черного моря как потенциального района промышленного культивирования моллюсков.....	2
Фролова Т.С. Управление водными ресурсами в мире	1
Хлопкова М.В., Бархалов Р.М., Гусейнов К.М., Гасанова А.Ш. Чужеродные моллюски в прибрежной части дагестанского района Каспийского моря.....	4

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Гайворонский В.Г., Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш. Изменение активности каталазы в почвах Крыма при загрязнении мазутом.....	1
Дмитриева М.В., Мязин В.Д., Золотухина Е.В. Влияние pH и состава питательной среды на дегидрогеназную активность экстрактов, полученных из <i>Escherichia coli</i>	3
Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Цепина Н.И., Казеев К.Ш. Влияние загрязнения таллием на активность ферментов циклов углерода, азота и фосфора в почвах разной буферности.....	4
Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С., Труфанов Д.А. Влияние загрязнения AgNPs на эмиссию углекислого газа черноземом.....	1
Щербина В.Г. Влияние аллелопатии на начальных стадиях развития каштана посевного в условиях антропогенной нагрузки	2

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Абанин А.В., Ватульян А.О., Карякин М.И., Мелихов С.Н. Анатолий Георгиевич Кусраев (к 70-летию со дня рождения)	1
Бабешко В.А., Ворович Л.С., Гетман И.П., Ерусалимский Я.М., Карякин М.И., Кусраев А.Г. Александр Ованесович Ватульян (70 лет со дня рождения)	4
Ватульян А.О., Ерусалимский Я.М. Михаил Игорьевич Карякин (к 60-летию со дня рождения).....	1
Ватульян А.О., Карякин М.И. Леонид Михайлович Зубов (80 лет со дня рождения).....	3
Татьяна Александровна Ватульян.....	3

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

Миноранский В.А., Тимофеенко Ю.В. III Международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (г. Керчь, 13–18 сентября 2022 г.).....	1
---	---

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

Абанин А.В., Ватульян А.О., Казак В.В., Карякин М.И., Налбандян Ю.С., Ситник С.М. Сергей Борисович Климентов (1951–2023).....	2
Абанин А.В., Ватульян А.О., Карякин М.И., Ситник С.М. Юрий Анатольевич Устинов (1934–2023)	2
Лурье П.М., Федоров Ю.А. Василий Данилович Панов (1936–2023)	2

Научные специальности и соответствующие им отрасли науки, по которым издание включено в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

Физико-математические науки

- 1.1.1. Вещественный, комплексный и функциональный анализ
- 1.1.3. Геометрия и топология
- 1.1.6. Вычислительная математика
- 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела
- 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Науки о Земле

- 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых
- 1.6.6. Гидрогеология
- 1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов
- 1.6.13. Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география
- 1.6.15. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель
- 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия
- 1.6.17. Океанология
- 1.6.18. Науки об атмосфере и климате

Правила оформления статьи

1. Материалы, предназначенные для публикации, могут быть представлены в редакцию одним из следующих способов:

- присланы по электронной почте: izvestiya@sfedu.ru;
- принесены в редакцию лично по адресу: г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110.

2. К статье прилагаются на отдельном листе на русском и английском языках:

– сведения о каждом из авторов (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, учёная степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, телефоны). Если авторов несколько, указать, с кем вести переписку;

- аннотация (1500–2000 знаков/150–200 слов);
- название статьи и фамилии авторов;
- ключевые слова (8–10);
- индекс УДК.

3. Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой единиц (СИ).

4. Объем статьи – не менее 8 страниц машинописного текста, включая таблицы, список литературы (желательно не менее 10 источников) и рисунки (не более 5).

5. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Поля со всех сторон – 2,5 см. Не следует использовать знаки принудительного переноса и дополнительных пробелов.

6. Статья должна содержать лишь необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. Большие формулы надо разбить на несколько строк. Векторные величины и матрицы выделяются прямым полужирным шрифтом. Нумеруются только те формулы, на которые имеются ссылки. Нумерация формул – сквозная по всей статье.

7. Таблицы должны иметь заголовки на русском и английском языках; в них допускаются только общепринятые сокращения. Желательно, чтобы таблица не превышала одной страницы текста. Количество таблиц не может превышать количество страниц.

Рисунки, графики и схемы располагаются в папке «Рисунки». Каждый рисунок должен иметь подрисовочную подпись на русском и английском языках. Цветные рисунки могут быть размещены за дополнительную плату.

8. Литература приводится в порядке упоминания в конце статьи, ссылки в тексте – в квадратных скобках. Допускаются ссылки только на опубликованные материалы. Иностранные источники даются на языке оригинала. При ссылке на электронный ресурс указывается дата обращения.

Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.0.5-2008.

Список литературы должен быть продублирован на английском языке.

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

Подписано в печать 25.12.2023. Выход в свет 27.12.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 19,99. Уч.-изд. л. 22,44. Тираж 250 экз. Заказ № 9334 .

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

Signed print December 25, 2023. The publication December 27, 2023. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 19.99. Publ. sign. 22.44. Edition 250 copies. Order number 9334 .

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