

ISSN 1026-2237

DOI 10.18522/1026-2237

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2025

1

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, академик РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Россия
В.И. Колесников – академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНИЦ РАН, Россия
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Г.Г. Бабаян – доктор техн. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения
О.С. Безуглова – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Н.И. Бойко – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.В. Бочкарев – доктор геол.-мин. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия
Л.С. Ворович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
О.Н. Демина – доктор биол. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия
А.Г. Захаров – доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Л.М. Зубов – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Ю. Жуков – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Н. Карапетянц – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Д.В. Карелин – доктор биол. наук, Институт географии РАН, Россия
М.И. Карякин – доктор физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
С.И. Колесников – кандидат геогр. наук, доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Е.М. Колосова – кандидат физ.-мат. наук, Южный федеральный университет, Россия
Г.В. Куповых – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.В. Курбатов – доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.М. Лерер – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.Н. Мелихов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Миноранский – доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.В. Онищенко – доктор геогр. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия
О.В. Назаренко – кандидат геогр. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
С.Г. Парада – доктор геол.-мин. наук, доцент, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
Г.В. Пироговская – доктор с.-х. наук, профессор, Институт почвоведения и агрохимии НАН РБ, Белоруссия
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика
М.А. Сазыкина – доктор биол. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
В.И. Силаев – доктор геол.-мин. наук, Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Россия
В.Н. Труфанов – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
П. Фатгаль – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

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

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Main Edition:

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

Editorial Board:

M.A. Borovskaya - Editor-in-Chief, Academician, Russian Academy of Education, Doctor of Economics, Professor, Southern Federal University, Russia
V.E. Zakrutkin - Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chairman of the Editorial Board, Candidate of Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
V.A. Babeshko - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kuban State University, Russia
B.S. Karamurзов - Doctor of Technical Sciences, Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Russia
V.I. Kolesnikov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rostov State Transport University, Russia
A.G. Kusraev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
G.G. Matishov - Academician, Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia
A.V. Abanin - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
G.G. Babayan - Doctor of Technical Sciences, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Armenia
O.S. Bezuglova - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
N.I. Boiko - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
A.V. Bochkarev - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Russia
L.S. Vorovich - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
O.N. Dyomina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia
M.Y. Zhukov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
A.G. Zakharov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
L.M. Zubov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
A.N. Karapetyants - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
Dmitry V. Karelin - Doctor of Biology, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences
M.I. Karjakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
S.I. Kolesnikov - Candidate of Geography, Doctor of Agricultural Science, Professor, Southern Federal University, Russia
E.M. Kolosova - Candidate of Physics and Mathematics, Southern Federal University, Russia
G.V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.V. Kurbatov - Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
A.M. Lerer - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
S.N. Melikhov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia
V.A. Minoranskiy - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
V.V. Onishchenko - Doctor of Geography, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia
O.V. Nazarenko - Candidate of Geography, Associate Professor, Southern Federal University, Russia
S.G. Parada - Doctor of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
G.V. Pirogovskaya - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Belarus
V.S. Rabinovich - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National Polytechnic Institute, Mexico
M.A. Sazykina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia
Valerii I. Silaev - Doctor of Geology and Mineralogy, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia
V.N. Trufanov - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia
P. Fattal - PhD, Professor, University of Nantes, France
Yu.A. Fedorov - Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia
A.D. Khovanskiy - Candidate of Geology and Mineralogy, Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia

The Founders

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1>

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
№ 1 (225) 2025 г.

Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 1 (225) 2025

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Абанин А.В., Литвинов А.А.</i> Представляющие системы в пространствах с топологиями, задаваемыми наборами квазипреднорм	4
<i>Бибик Ю.В.</i> Прогнозирование распространения опасных вирусных заболеваний с использованием гамильтонова формализма и фактических данных динамики COVID-19 ...	10
<i>Гетман В.А., Долгих Т.Ф.</i> Задача Коши для описания поведения плоской электромагнитной волны в анизотропной среде	28
<i>Сумбатян М.А., Боев Н.В., Харитонов В.С.</i> Эффекты фокусировки при отражении волн от внутренней границы эллипса	40

<i>Abanin A.V., Litvinov A.A.</i> Representing Systems in Spaces with Topologies Defined by Families of Quasi-prenorms.....	4
<i>Bibik Yu.V.</i> Forecasting the Spread of Dangerous Viral Diseases Using the Hamiltonian Formalism and Factual Data of the Dynamics of COVID-19.....	10
<i>Getman V.A., Dolgikh T.F.</i> Cauchy Problem for Describing the Behavior of a Plane Electromagnetic Wave in an Anisotropic Medium.....	28
<i>Sumbatyan M.A., Boyev N.V., Kharitonov V.S.</i> Focusing Effects in Reflection of Waves From the Inner Boundary of an Ellipse.....	40

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

<i>Анциферова М.А.</i> Концентрации микропластика в некоторых реках и водохранилищах Юга России.....	51
<i>Асварова Т.А., Гасанов Г.Н., Усманов Р.З., Гаджиев К.М., Абдулаева А.С., Баширов Р.Р., Гимбатова К.Б.</i> Влияние климатических показателей на состояние растительного покрова Терско-Кумской низменности в условиях аридизации	58
<i>Захарихина Л.В., Лесникова П.С., Рогожина Е.В., Керимзаде В.В., Бригида В.С.</i> Геохимия атмосферных осадков в прибрежной зоне Сочинского Причерноморья...	67

<i>Antsiferova M.A.</i> Microplastic Concentrations in Some Rivers and Reservoirs in Southern Russia.....	51
<i>Asvarova T.A., Gasanov G.N., Usmanov R.Z., Gadzhiev K.M., Abdulaeva A.S., Bashirov R.R., Gimbatova K.B.</i> The Influence of Climatic Indicators on the State of the Vegetation Cover of the Terek-Kuma Lowland Under Conditions of Aridization.....	58
<i>Zakharikhina L.V., Lesnikova P.S., Rogozhina E.V., Kerimzade V.V., Brigida V.S.</i> Geochemistry of Atmospheric Sediments in the Coastal Zone of the Sochi Black Sea Region.....	67

Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Фаррахова Н.Н. Минералогия медных шлаков Уктусского металлургического завода	80
Лобусев А.В., Салахова Л.Н., Бочкарев В.А., Антипова Ю.А. Онтогенез углеводородов Каспийского моря	88
Тимошенко Д.В. Особенности электродного эффекта в приземном слое атмосферы в условиях неоднородного рельефа земной поверхности.....	97

Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Shiryayev P.B., Farrakhova N.N. Mineralogy of Copper Slags From Uktus Metallurgical Plant	80
Lobusev A.V., Salakhova L.N., Bochkarev A.V., Antipova Yu.A. Ontogenesis of Hydrocarbons in the Caspian Sea	88
Timoshenko D.V. Features of the Electrode Effect in the Surface Layer of the Atmosphere under Conditions of Non-Uniform Relief of the Earth's Surface.....	97

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Васильченко Н.Г., Механцева К.В., Иванов Ф.Д., Пуликова Е.П., Чистяков В.А., Усатов Ал.В., Брень А.Б., Рудой Д.В. Биотехнологически перспективные гидролитические свойства бактерий родов <i>Bacillus</i> и <i>Paenibacillus</i> , выделенных из ризосферы пшеницы озимой (<i>Triticum aestivum</i> L.). Часть 2	104
Лиджиева Н.Ц., Онкорова Н.Т., Бадмаева Г.Д., Мачкаева Е.М. Взаимосвязь морфологических признаков растений в полихромных популяциях <i>Tulipa suaveolens</i> Roth (Liliaceae).....	119
Науменко Ю.В., Назын Ч.Д., Кашкак Е.С., Ондар У.В., Ооржак У.С. Структура водорослевых сообществ и гидрохимическая характеристика реки Ий-Хем (Республика Тыва, Россия).....	126
Полякова Н.В., Мурзабулатова Ф.К., Абдуллина Р.Г., Билалова Р.А., Рязанова Н.А. Оценка интродукционной устойчивости и перспективности некоторых древесных растений в условиях города Уфы.....	133

Vasilchenko N.G., Mekhantseva K.V., Ivanov F.D., Pulikova E.P., Chistyakov V.A., Usatov Al.V., Bren A.B., Rudoy D.V. Biotechnological Potential of Hydrolytic Properties of <i>Bacillus</i> and <i>Paenibacillus</i> Species Isolated from the Winter Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Rhizosphere. Part 2	104
Lidzhieva N.Ts., Onkorova N.T., Badmaeva G.D., Machkaeva E.M. Interrelationship of Morphological Characters of Plants in Polychrome Populations of <i>Tulipa suaveolens</i> Roth (Liliaceae)	119
Naumenko Yu.V., Nazyn Ch.D., Kashkak E.S., Ondar U.V., Oorzhak U.S. Structure of Algae Communities and Hydrochemical Characteristics of the River Iy-Hem River (Republic of Tyva, Russia).....	126
Polyakova N.V., Murzabulatova F.K., Abdullina R.G., Bilalova R.A., Ryazanova N.A. Assessment of the Introduction Resistance and Prospects of Some Woody Plants in the Conditions of the City of Ufa	133

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

Миноранский В.А., Кулиш А.В., Тимофеев Ю.В. IV Международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (г. Керчь, 17–23 сентября 2024 г.)	140
---	-----

Minoransky V.A., Kulish A.V., Timofeenko Yu.V. IV International Scientific and Practical Conference “Biological Diversity: Study, Conservation, Restoration, Rational Use” (Kerch, September 17-23, 2024).	140
---	-----

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Налбандян Ю.С. Александр Васильевич Абанин (к 70-летию).....	144
Владимир Исаакович Минкин (к 90-летию).....	147

OUR PERSONS

Nalbandyan Yu.S. Alexander Vasilievich Abanin (to the 70th Anniversary).....	144
Vladimir Isaakovich Minkin (to the 90th Anniversary)....	147

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 517.9

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-4-9>

ПРЕДСТАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ В ПРОСТРАНСТВАХ С ТОПОЛОГИЯМИ, ЗАДАВАЕМЫМИ НАБОРАМИ КВАЗИПРЕДНОРМ

Александр Васильевич Абанин ^{1✉}, Александр Александрович Литвинов ²

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

¹ Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания, Россия

¹ avabanin@sfn.ru [✉], <https://orcid.org/0000-0003-4507-4508>

² aleksandrl@sfn.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6437-9511>

Аннотация. Основы теории представляющих систем в линейных топологических пространствах и абсолютно представляющих систем в локально выпуклых пространствах были заложены примерно полвека назад в фундаментальных работах Ю.Ф. Коробейника. Главными объектами исследования и одновременно инструментами этой теории являются коэффициентные пространства и операторы представления. Однако если для абсолютно представляющих систем в локально выпуклых пространствах удалось развить достаточно богатую теорию, имеющую важные применения, то представляющие системы в линейных топологических пространствах малоисследованы и практически не имеют приложений. В значительной мере это связано с тем, что в локально выпуклых пространствах топологии задаются наборами преднорм и для широких классов таких пространств имеется хорошо развитая теория двойственности. Между тем имеется более широкий класс линейных топологических пространств, которые необязательно являются локально выпуклыми, но топология в которых задается наборами квазипреднорм (по сравнению с преднормами для них выполняется ослабленное неравенство треугольника). Формально для них можно использовать определение абсолютно представляющих систем, введенное Ю.Ф. Коробейником. Однако наш анализ показал, что на его базе невозможно развить основополагающие методы использования коэффициентных пространств и операторов представления. В настоящей статье введено новое понятие абсолютно представляющих систем в линейных топологических пространствах с топологиями, задаваемыми наборами квазипреднорм, которое обобщает определение Ю.Ф. Коробейника. На его основе введены и изучены свойства коэффициентных пространств и доказано, что в каждом сепарабельном пространстве с топологией, задаваемой счетным набором квазипреднорм, существует абсолютно представляющая система элементов. Полученные результаты составляют основу для дальнейших исследований абсолютно представляющих систем в двух направлениях: 1) характеристика их с помощью нетривиальных разложений нуля и интерполяционных задач; 2) построение и использование двойственной теории достаточных множеств.

Ключевые слова: абсолютно представляющие системы, квазипреднормы, коэффициентные пространства, операторы представления, топология

Для цитирования: Абанин А.В., Литвинов А.А. Представляющие системы в пространствах с топологиями, задаваемыми наборами квазипреднорм // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 4–9. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-4-9>

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

Original article

REPRESENTING SYSTEMS IN SPACES WITH TOPOLOGIES DEFINED BY FAMILIES OF QUASI-PRENORMS

Alexander V. Abanin^{1✉}, **Alexander A. Litvinov**²

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

¹ Southern Mathematical Institute – Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Russia

¹ avabanin@sfnedu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4507-4508>

² aleksandrl@sfnedu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6437-9511>

Abstract. The foundations of the theory of representing systems in linear topological spaces and absolutely representing systems in locally convex ones were established in fundamental works of Yu.F. Korobeinik about half a century ago. The main research objects and at the same time the instruments of this theory are coefficient spaces and representation operators. However, if it was possible to develop a rich enough theory for absolutely representing systems in locally convex spaces, which has important applications, representing systems in linear topological spaces are few studied and has almost no applications. This is largely due to the fact that the topologies in locally convex spaces are defined by systems of prenorms and, for wide classes of such spaces, there is a well-developed theory of duality. At the same time there is a wider class of linear topological spaces which are not necessarily locally convex, but they are endowed with the topologies given by families of quasi-prenorms (compared to prenorms they satisfy the weak triangle condition). We can use for them the definition of absolutely representing systems that was introduced by Yu.F. Korobeinik. But our analysis shows that this is impossible to develop fundamental methods of using coefficient spaces and representation operators based on this definition. In the present paper it is introduced a new concept of absolutely representing systems in linear topological spaces endowed with the topologies given by families of quasi-prenorms which generalizes the definition of Yu.F. Korobeinik. Based on this new concept, it is introduced coefficient spaces and studied their properties, and it is proved that in each separable space with the topology given by a countable family of quasi-prenorms there exists an absolutely representing system. These results provided a basis for further study of absolutely representing systems in two directions: 1) characterization of such systems in terms of nontrivial expansions of zero and interpolation problems and 2) construction and use of a dual theory of sufficient sets.

Keywords: absolutely representing systems, quasi-prenorms, coefficient spaces, representation operators, topology

For citation: Abanin A.V., Litvinov A.A. Representing Systems in Spaces with Topologies Defined by Families of Quasi-Prenorms. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):4-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-4-9>

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

В работах Ю.Ф. Коробейника и его последователей была развита теория абсолютно представляющих систем (АПС) в локально выпуклых пространствах [1–4]. Она имеет широкую область применений в решении ряда задач, включая вопросы разрешимости различных функциональных уравнений и конструктивного построения их решений, а также непосредственным образом связана с достаточными в смысле Л. Эренпрайса и слабодостаточными в смысле Д.М. Шнайдера множествами. Для линейных топологических пространств, не являющихся локально выпуклыми, Ю.Ф. Коробейником были введены представляющие системы, для них получен ряд результатов, которые, однако, не удалось развить в той же мере, как для АПС в локально выпуклых пространствах. Более того, сегодня не известно ни одного конкретного пространства, в котором удалось бы использовать представляющие системы для решения каких-либо задач. Возвращаясь к АПС, отметим, что главным образом она развивалась для пространств Фреше и (LB)-пространств, т.е. проективных и индуктивных пределов последовательностей банаховых пространств. Более широким семейством, чем банаховы, являются квазибанаховы пространства. Их определение основано на

ослабленном варианте неравенства треугольника. Классические шкалы пространств ℓ^p , Лебега L^p , Бергмана A^p и Фока \mathcal{F}^p ($0 < p < \infty$) состоят из квазибаначовых пространств, которые при $p \geq 1$ являются банаховыми, а при $0 < p < 1$ – квазибаначовыми, но не банаховыми. Условимся называть последние пространства существенно квазибаначовыми. Как хорошо известно, развитие теории, как общей, так и для конкретных пространств, было в основном сосредоточено на банаховом случае. Разработанные при этом методы и полученные результаты в подавляющем большинстве не могут быть использованы для существенно квазибаначовых пространств. В то же время последние имеют важное значение для развития общей теории и в ряде прикладных областей [5].

В связи с вышеизложенным возникает задача развития теории АПС в проективных и индуктивных пределах последовательностей квазибаначовых пространств (будем коротко называть их (QF)- и (QLB)-пространствами), которая в качестве частного случая содержала бы теорию Ю.Ф. Коробейника. Основу последней составляет подход, опирающийся на использование коэффицентных пространств, построенных по исследуемой системе элементов, и изучение свойств соответствующего оператора представления. Разработка аналога этого подхода для пространств с топологиями, задаваемыми наборами квазипреднорм, составляет содержание настоящей статьи. При этом мы будем существенно опираться на методы статьи Ю.Ф. Коробейника [1], адаптация которых к более общему случаю и представляет, на наш взгляд, основной интерес. Завершая освещение постановки задачи и мотивации для ее изучения, отметим, что результаты, которые будут представлены ниже, составят основу для развития аналогов теории достаточных множеств в сопряженных пространствах и исследования их взаимосвязи с АПС в (QF)- и (QLB)-пространствах.

Напомним необходимые для дальнейшего сведения. Всюду далее E – линейное пространство над полем \mathbb{C} . Квазипреднормой называется функция $p: E \rightarrow [0; +\infty)$, удовлетворяющая условиям:

$$(ii) p(\lambda x) = |\lambda|p(x), \forall \lambda \in \mathbb{C}, \forall x \in E;$$

$$(iii) \exists K \geq 1: p(x + y) \leq K(p(x) + p(y)), \forall x, y \in E.$$

E вместе с квазипреднормой p называется квазипреднормируемым пространством (E, p) . Как известно, для любой такой квазипреднормы существует метрика, инвариантная относительно сдвигов: $\rho(x, y) = \rho(x - y, 0)$, для которой $\rho(x, y) \leq p^s(x - y) \leq 2\rho(x, y)$, $\forall x, y \in E$, где $s = \frac{1}{\log_2 2K} \in (0, 1]$. Любое направленное семейство квазипреднорм $\mathcal{P} = \{p\}$ ($\forall p_1, p_2 \in \mathcal{P} \exists p_3 \in \mathcal{P}$ и $C > 0: \max\{p_1(x), p_2(x)\} \leq Cp_3(x), \forall x \in E$) стандартным образом задает топологию на E (далее – $\tau_{\mathcal{P}}$).

Пусть $(E, \tau_{\mathcal{P}})$ – линейное топологическое пространство с топологией, заданной направленным семейством квазипреднорм \mathcal{P} ; $X = (x_k)_{k=1}^{\infty}$ – фиксированная последовательность ненулевых элементов E . X называется АПС в E , если каждый элемент $x \in E$ можно представить в виде суммы ряда $x = \sum_{k=1}^{\infty} c_k x_k$, $c_k \in \mathbb{C}$, сходящегося в E абсолютно, т.е. $\forall p \in \mathcal{P}: p(x - \sum_{k=1}^n c_k x_k) \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$, и $\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^s p^s(x_k) < \infty$, $s = s(p)$. В случае, когда \mathcal{P} состоит из преднорм, $s(p) = 1$ для любого $p \in \mathcal{P}$ и, следовательно, введенное определение совпадает с упомянутым выше определением Ю.Ф. Коробейника. Очевидно, что всякая АПС является полной системой в E .

Введем коэффицентное пространство

$$A_2(E, X) := \left\{ c = (c_k)_{k=1}^{\infty} \in \mathbb{C}^{\mathbb{N}}: |c|_p := \left(\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^s p^s(x_k) \right)^{\frac{1}{s}} < \infty, \forall p \in \mathcal{P} \right\}$$

и покажем, что $|c|_p$ – квазипреднорма для любой $p \in \mathcal{P}$. Выполнение условия (ii): $|\lambda c|_p = |\lambda| |c|_p$ для любых $\lambda \in \mathbb{C}$ и $c \in A_2(E, X)$ очевидно. Учитывая, что $s \in (0, 1]$, имеем для любых $c^{(1)}, c^{(2)} \in A_2(E, X)$

$$\begin{aligned} |c^{(1)} + c^{(2)}|_p^s &= \sum_{k=1}^{\infty} |c_k^{(1)} + c_k^{(2)}|^s p^s(x_k) \leq \sum_{k=1}^{\infty} |c_k^{(1)}|^s p^s(x_k) + \sum_{k=1}^{\infty} |c_k^{(2)}|^s p^s(x_k) = \\ &= |c^{(1)}|_p^s + |c^{(2)}|_p^s \leq 2 \left(\frac{|c^{(1)}|_p + |c^{(2)}|_p}{2} \right)^s. \end{aligned}$$

Возведем первую и последнюю часть неравенства в степень $\frac{1}{s}$

$$|c^{(1)} + c^{(2)}|_p \leq 2^{\frac{1}{s}-1} (|c^{(1)}|_p + |c^{(2)}|_p) = K (|c^{(1)}|_p + |c^{(2)}|_p).$$

Таким образом, $c^{(1)} + c^{(2)}$ принадлежит $A_2(E, X)$ и выполнено условие (iii). Из сказанного выше следует, что E – линейное пространство, которое мы наделим топологией, определяемой набором квазипреднорм $\{|c|_p: p \in \mathcal{P}\}$.

Предложение 1. Если пространство E отделимо, то $A_2(E, X)$ также отделимо.

Доказательство. Если пространство E отделимо, то $\forall x \in E \setminus \{0\} \exists p \in \mathcal{P}: p(x) > 0$. Покажем, что для любой ненулевой последовательности $(c_k)_{k=1}^\infty \in A_2(E, X) \exists |c|_p \in \mathcal{P}: |c|_p > 0$. Пусть k_0 таково, что $c_{k_0} \neq 0$. Так как $x_{k_0} \neq 0$, то в силу отделимости $E, \exists p \in \mathcal{P}: p(x_{k_0}) \neq 0$. Получаем

$$|c|_p = (\sum_{k=1}^\infty |c_k|^s p^s(x_k))^{1/s} \geq (|c_{k_0}|^s p^s(x_{k_0}))^{1/s} = |c_{k_0}| p(x_{k_0}) > 0.$$

Лемма. Если p – квазипреднорма, то справедливо следующее неравенство:

$$p^s(\sum_{k=1}^n c_k x_k) \leq 2 \sum_{k=1}^n |c_k|^s p^s(x_k), \forall n.$$

Доказательство. Как было отмечено выше, существует такая метрика $\rho(x, y)$, инвариантная относительно сдвигов, что $\rho(x, y) \leq p^s(x - y) \leq 2\rho(x, y)$. Учитывая это, имеем

$$p^s(\sum_{k=1}^n c_k x_k) \leq 2\rho(\sum_{k=1}^n c_k x_k, 0) \leq 2 \sum_{k=1}^n \rho(c_k y_k, 0) \leq 2 \sum_{k=1}^n |c_k|^s p^s(x_k).$$

Предложение 2. Если пространство E полно, то для любой последовательности $c = (c_k)_{k=1}^\infty \in A_2(E, X)$ ряд $\sum_{k=1}^\infty c_k x_k$ сходится в E .

Доказательство. Если пространство E полно, то любая фундаментальная последовательность сходится в E . Имеем, что ряд $(\sum_{k=1}^\infty |c_k|^s p^s(x_k))^{1/s}$ сходится. Тогда он удовлетворяет критерию Коши для числового ряда, т.е. $\forall \varepsilon > 0 \exists N: \sum_{k=n+1}^{n+m} |c_k|^s p^s(x_k) < \varepsilon, \forall n > N, \forall m \in \mathbb{N}$. Тогда в силу леммы $p^s(\sum_{k=n+1}^{n+m} c_k x_k) \leq 2 \sum_{k=n+1}^{n+m} |c_k|^s p^s(x_k) < \varepsilon, \forall n > N, \forall m \in \mathbb{N}$. В силу полноты E ряд $\sum_{k=1}^\infty c_k x_k$ сходится.

Необходимым условием существования хотя бы одной АПС в E является сепарабельность E . Покажем, что для отделимых линейных топологических пространств, в которых топология задается счетным набором квазипреднорм, верно и обратное утверждение.

Предложение 3. Пусть E – отделимое сепарабельное линейное топологическое пространство, в котором топология задается счетным набором квазипреднорм $\mathcal{P} = \{p_1, p_2 \dots\}$. Тогда в нем имеется АПС.

Доказательство. Для простоты будем считать, что p_i – квазипреднорма и $p_1(x) \leq p_2(x) \dots, \forall x \in E$ (здесь каждой квазипреднорме p_i соответствует число $s_i = \frac{1}{\log_2 2K_i}$). Так как E сепарабельно, то существует всюду плотная в E последовательность $(x_k)_{k=1}^\infty$. Покажем, что она составляет АПС в E . Зафиксируем любое $x \in E$. Найдем $x_{n_1}: p_1(x - x_{n_1}) \leq 1$. Затем $x_{n_2}: p_2(x - x_{n_1} - x_{n_2}) \leq \frac{1}{2}$. Потом $x_{n_3}: p_3(x - x_{n_1} - x_{n_2} - x_{n_3}) \leq \frac{1}{2^2}$ и т.д. Очевидно, что для p_n имеем $p_n(x - \sum_{i=1}^n x_{n_i}) \leq \frac{1}{2^{n-1}}$. Из условий выше следует цепочка неравенств: $p_1(x_{n_2}) = p_1((x - x_{n_1}) - (x - x_{n_1} - x_{n_2})) \leq K_1(p_1(x - x_{n_1}) + p_1(x - x_{n_1} - x_{n_2})) \leq K_1(1 + p_2(x - x_{n_1} - x_{n_2})) \leq \frac{3K_1}{2} = \frac{3 \cdot 2^{s_1-1}}{2}$.

$$\text{Для } p_1(x_{n_3}): p_1(x_{n_3}) \leq K_1(p_1(x - x_{n_1} - x_{n_2}) + p_1(x - x_{n_1} - x_{n_2} - x_{n_3})) \leq \frac{3K_1}{2^2} = \frac{3 \cdot 2^{s_1-1}}{2^2}.$$

Для $p_1(x_{n_k})$ получим $p_1(x_{n_k}) \leq K_1(p_1(x - \sum_{i=1}^{k-1} x_{n_i}) + p_1(x - \sum_{i=1}^k x_{n_i})) \leq \frac{3K_1}{2^{k-1}} = \frac{3 \cdot 2^{s_1-1}}{2^{k-1}}$. Тогда $\forall p \in \mathcal{P} p(x - \sum_{i=1}^n x_{n_i}) \leq \frac{1}{2^{n-1}} \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$. Таким образом, справедливо представление.

В итоге $\sum_{k=1}^\infty p_1^{s_1}(x_{n_k}) \leq \sum_{k=1}^\infty \frac{2 \cdot 3^{s_1}}{2^{ks_1}} \leq 2 \cdot 3^{s_1} \sum_{k=1}^\infty \frac{1}{2^{ks_1}} \leq 2 \cdot 3^{s_1} \cdot \frac{1}{2^{s_1-1}} < \infty$. Получаем, что каждый элемент $x \in E$ представим в виде суммы ряда, сходящегося в E абсолютно. Таким образом, последовательность $(x_k)_{k=1}^\infty$ является АПС в E .

Рассмотрим один важный частный случай линейных топологических пространств E с топологиями, задаваемыми такими семействами квазипреднорм \mathcal{P} , что $\exists K \geq 1 \forall p \in \mathcal{P}: p(x + y) \leq K(p(x) + p(y)), \forall x, y \in E$. В этом случае $s = \frac{1}{\log_2 2K}$ одно и то же для всех $p \in \mathcal{P}$. Назовем их линейными топологическими пространствами с топологиями, задаваемыми наборами s -квазипреднорм.

Предложение 4. Пусть E и F – линейные топологические пространства с топологиями, задаваемыми наборами \mathcal{P} s -квазипреднорм и \mathcal{Q} r -квазипреднорм, причем $r \geq s$. Если $L: E \rightarrow F$ – эпиморфизм и $(x_k)_{k=1}^\infty$ – АПС в E , то $(Lx_k)_{k=1}^\infty$ – АПС в F .

Доказательство. Из эпиморфности $L: E \rightarrow F$ следует, что $\forall y \in F \exists x \in X: y = Lx$. Разлагаем x по АПС $(x_k)_{k=1}^\infty: x = \sum_{k=1}^\infty c_k x_k; \sum_{k=1}^\infty |c_k|^s p^s(x_k) < \infty, \forall p \in \mathcal{P}$. Тогда $y = Lx = \sum_{k=1}^\infty c_k Lx_k$ в F . Остается проверить, что $\forall q \in \mathcal{Q}$ имеем $\sum_{k=1}^\infty |c_k|^r q^r(Lx_k) < \infty$. Так как $L: E \rightarrow F$ – эпиморфизм, то оператор L непрерывный, т.е. $\forall q \in \mathcal{Q} \exists p \in \mathcal{P} \exists C > 0: q(Lx_k) \leq Cp(x_k), \forall k \geq 1$. Так как $\sum_{k=1}^\infty |c_k|^s p^s(x_k) < \infty$, то $|c_k|p(x_k) \leq 1$, начиная с некоторого номера. Тогда $|c_k|q(Lx_k) \leq C|c_k|p(x_k) \leq C$ и $|c_k|^r q^r(Lx_k) \leq C^r |c_k|^r p^r(x_k) \leq C^r |c_k|^s p^s(x_k)$, так как $r \geq s$ ($r, s \in (0; 1]$). Отсюда следует, что $\sum_{k=1}^\infty |c_k|^r q^r(Lx_k) < \infty$. Таким образом, $(Lx_k)_{k=1}^\infty$ – АПС в F .

Предложение 5. Пространство $A_2(E, X)$ полно.

Доказательство. Пусть $c^{(m)} = (c_{k,m})_{k=1}^\infty$ – последовательность Коши в $A_2(E, X)$, т.е. $\forall p \in \mathcal{P} \forall \varepsilon > 0 \exists N: |c^{(m)} - c^{(n)}|_p < \varepsilon, \forall m, n > N$, т.е. $\sum_{k=1}^\infty |c_k^{(m)} - c_k^{(n)}|^s p^s(x_k) < \varepsilon^s, \forall m, n > N$. Из последнего следует, что $|c_k^{(m)} - c_k^{(n)}|^s p^s(x_k) < \varepsilon^s$ или $|c_k^{(m)} - c_k^{(n)}| p(x_k) < \varepsilon$. При каждом фиксированном $k \in \mathbb{N}$ в силу отделимости $E \exists p \in \mathcal{P}: p(x_k) > 0$. Отсюда имеем, что при каждом фиксированном $k \in \mathbb{N}$ последовательность чисел $(c_k^{(m)})_{m=1}^\infty$ – последовательность Коши в \mathbb{C} . По критерию Коши она сходится, т.е. при каждом $k \in \mathbb{N}$ существует $\lim_{m \rightarrow \infty} c_k^{(m)} =: c_k \in \mathbb{C}$. Осталось доказать, что $c = (c_k)_{k=1}^\infty \in A_2(E, X)$ и $c^{(m)}$ сходится к c в $A_2(E, X)$. Имеем $\forall L \in \mathbb{N} \sum_{k=1}^L |c_k^{(m)} - c_k^{(n)}|^s p^s(x_k) < \varepsilon^s$. При каждом фиксированном $m > N$, переходя к пределу при $n \rightarrow \infty$, получим $\sum_{k=1}^L |c_k^{(m)} - c_k|^s p^s(x_k) \leq \varepsilon^s$. Переходя теперь к пределу при $L \rightarrow \infty$, заключаем, что $\sum_{k=1}^\infty |c_k^{(m)} - c_k|^s p^s(x_k) \leq \varepsilon^s, \forall m > N$, или $|c^{(m)} - c| \leq \varepsilon, \forall m > N$. Получаем, что $c^{(m)} - c \in A_2(E, X)$. В силу линейности $A_2(E, X)$ $c = c^{(m)} - (c^{(m)} - c) \in A_2(E, X), \forall m > N$. Таким образом, $c^{(m)} \rightarrow c$ в $A_2(E, X)$.

Пусть X – АПС в E . Если разложение каждого элемента $x \in E$ в ряд $x = \sum_{k=1}^\infty c_k x_k$ в E единственно, то X называется абсолютным базисом (АБ) в E . Обозначим k -й орт через e_k , а через $\mathcal{E} = (e_k)_{k=1}^\infty$ – последовательность всех ортов.

Предложение 6. Пусть $(E, \tau_{\mathcal{P}})$ – полное линейное топологическое пространство с топологией, заданной направленным семейством квазипреднорм \mathcal{P} ; $X = (x_k)_{k=1}^\infty$ – фиксированная последовательность ненулевых элементов E . Последовательность ортов $\mathcal{E} = (e_k)_{k=1}^\infty$ образует АБ в $A_2(E, X)$, причем разложение каждого $c \in A_2(E, X)$ имеет вид $c = \sum_{k=1}^\infty c_k e_k$.

Доказательство. Для упрощения записи обозначим $F = A_2(E, X)$.

1. По определению $A_2(E, X) \forall c \in A_2(E, X) \sum_{k=1}^\infty |c_k|^s p^s(x_k) < \infty, \forall p \in \mathcal{P}$. Так как $|e_k|_p = p(x_k)$, то $\sum_{k=1}^\infty |c_k|^s |e_k|_p^s < \infty, \forall p \in \mathcal{P}$. Значит, $c \in A_2(F, \mathcal{E})$. Верно и обратное: если $c \in A_2(F, \mathcal{E})$, т.е. $\sum_{k=1}^\infty |c_k|^s |e_k|_p^s < \infty, \forall p \in \mathcal{P}$, то тогда имеем $\sum_{k=1}^\infty |c_k|^s p^s(x_k) < \infty, \forall p \in \mathcal{P}$, т.е. $c \in A_2(E, X)$. Таким образом, $A_2(E, X) = A_2(F, \mathcal{E})$.

2. Так как пространство $A_2(E, X)$ полно, то и $A_2(F, \mathcal{E})$ полно. Из предыдущего пункта следует, что $\sum_{k=1}^\infty |c_k|^s |e_k|_p^s < \infty, \forall c = (c_k)_{k=1}^\infty \in A_2(E, X) = A_2(F, \mathcal{E})$. Тогда по предложению 2 в силу полноты $A_2(F, \mathcal{E})$ ряд $\sum_{k=1}^\infty c_k e_k$ сходится в $A_2(E, X)$ к $c = (c_k)_{k=1}^\infty$.

3. *Единственность.* Рассмотрим линейные функционалы $\varphi_k(c) = c_k, c = (c_k)_{k=1}^\infty$: они непрерывны на $A_2(E, X)$ для каждого $k \in \mathbb{N}$. В самом деле, в силу отделимости пространства $E \exists p \in \mathcal{P}: p(x_k) > 0$. Положив $C = \frac{1}{p(x_k)}$, имеем $|c_k| = \frac{|c_k|p(x_k)}{p(x_k)} = \frac{1}{p(x_k)} |c_k|p(x_k) = C |c_k|p(x_k) \leq C \left(\sum_{j=1}^\infty |c_j|^s p^s(x_j) \right)^{\frac{1}{s}} = C |c|_p$. Отсюда следует единственность разложения $c = \sum_{k=1}^\infty c_k e_k$.

Из предложений 4 и 6 получаем такое следствие – критерий АПС.

Предложение 7. Пусть E – полное топологическое пространство с топологией, задаваемой набором \mathcal{P} s -квазипреднорм. $X = (x_k)_{k=1}^\infty$ – АПС в E тогда и только тогда, когда существует

пространство F с топологией, задаваемой набором \mathcal{Q} s -квазипреднорм с АПС $Y = (y_k)_{k=1}^{\infty}$ и эпиморфизм $L: F \rightarrow E$ такой, что $Ly_k = x_k, k = 1, 2, \dots$

Доказательство. Необходимость. Пусть $X = (x_k)_{k=1}^{\infty}$ – АПС в E . Берем в качестве $F = A_2(E, X)$. В нем $\mathcal{E} = (e_k)_{k=1}^{\infty}$ – АБ в $A_2(E, X)$, тем более $\mathcal{E} = (e_k)_{k=1}^{\infty}$ – АПС в $A_2(E, X)$. Введем, пока формально, оператор $L(c) := \sum_{k=1}^{\infty} c_k x_k$ на $A_2(E, X)$. По предложению 2 для любого c из $A_2(E, X)$ ряд в определении L сходится к элементу $x \in E$, т.е. $L(c)$ определено корректно. Покажем, что L является эпиморфизмом из $A_2(E, X)$ на E . По определению АПС $\exists c \in A_2(E, X): Lc = x$, т.е. оператор L сюръективный. Осталось показать непрерывность оператора L , т.е. $\forall p \in \mathcal{P} \exists q \in \mathcal{P} \exists C > 0: p(Lc) \leq C|c|_p, \forall c \in A_2(E, X)$. Рассмотрим $q = p$. В силу леммы $p^s(\sum_{k=1}^n c_k x_k) \leq 2 \sum_{k=1}^n |c_k|^s p^s(x_k), \forall n$. Переходим здесь к пределу при $n \rightarrow \infty$ и получаем $p^s(x) \leq 2 \sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^s p^s(x_k) = 2|c|_p^s$. Тогда $p(Lc) \leq 2^{\frac{1}{s}} (\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^s p^s(x_k))^{\frac{1}{s}} = C|c|_p, \forall c \in A_2(E, X)$, и доказательство завершено.

Достаточность следует непосредственно из предложения 4.

Список источников

1. Коробейник Ю.Ф. Представляющие системы // Успехи мат. наук. 1981. Т. 36, вып. 1 (217). С. 73–123.
2. Коробейник Ю.Ф. Абсолютно представляющие семейства и реализация сопряженного пространства // Изв. вузов. Математика. 1990. № 2. С. 68–76.
3. Абанин А.В. Слабо достаточные множества и абсолютно представляющие системы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Ростов н/Д., 1995. 268 с.
4. Мелихов С.Н. Правые обратные к операторам представления рядами экспонент и свертки: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Ростов н/Д., 2002. 212 с.
5. Абанин А.В., Маннаников Р.С. Операторы весовой композиции на квазибанаховых весовых пространствах последовательностей // Владикавказ. мат. журн. 2023. Т. 25, вып. 4. С. 5–19. <https://doi.org/10.46698/x5057-2500-3053-t>

References

1. Korobeinik Yu.F. Representing systems. *Russian Mathematical Surveys*. 1981;36(1):73-123. (In Russ.).
2. Korobeinik Yu.F. Absolutely-representing families and realization of conjugate space. *Russian Mathematics*. 1990;(2):68-76. (In Russ.).
3. Abanin A.V. *Weakly sufficient sets and absolutely representing systems*. Dissertation. Rostov-on-Don, 1995. 268 p. (In Russ.).
4. Melikhov S.N. *The right inverse to the operators of representation by series of exponents and convolution*. Dissertation. Rostov-on-Don, 2002. 212 p. (In Russ.).
5. Abanin A.V., Mannanikov R.S. Weighted composition operators on quasy-Banach weighted sequence spaces. *Vladikavkaz Mathematical Journal*. 2023;25(4):5-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.46698/x5057-2500-3053-t>

Информация об авторах

А.В. Абанин – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математического анализа и геометрии, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ; заведующий отделом математического анализа, ЮМИ ВЦ РАН.
А.А. Литвинов – аспирант, кафедра математического анализа и геометрии.

Information about the authors

A.V. Abanin – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Mathematical Analysis and Geometry Department, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU; Head of the Department of Mathematical Analysis, SMI VSC RAS.
A.A. Litvinov – Postgraduate Student, Mathematical Analysis and Geometry Department.

Статья поступила в редакцию 07.09.2024; одобрена после рецензирования 24.09.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 07.09.2024; approved after reviewing 24.09.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 519.634

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-10-27>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ВИРУСНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАМИЛЬТОНОВА ФОРМАЛИЗМА И ФАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДИНАМИКИ COVID-19

Юрий Викторович Биби́к

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук,
Москва, Россия

yvbibik@ccas.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3806-2501>

Аннотация. Исследована целесообразность и эффективность применения компартментальных моделей для описания и прогнозирования одноволнового и многоволнового характера распространения опасных вирусных заболеваний с помощью, основанного на гамильтоновом формализме аналитического метода и фактических данных динамики COVID-19. Предложенный аналитический метод разработан с применением выполненного в работе явного аналитического решения исходной модели SIR для описания одноволновой и многоволновой динамики эпидемического процесса (в виде композиции одноволновых решений) и позволяет как с использованием математического аппарата, так и визуально оценивать и отслеживать эффективность прогнозирования многоволновой динамики заболевания. Явное аналитическое решение модели SIR получено с построением гамильтониана модели и обращением неявного решения методом теории возмущений относительно эталонного решения. Работоспособность метода проверена и подтверждена путем аппроксимации официальных фактических данных динамики COVID-19 в г. Москве и г. Санкт-Петербурге за период с 05.09.2023 по 30.04.2024. Математические результаты представлены графически. В работе выполнен краткий анализ влияющих на точность моделирования и прогнозирования особенностей и проблем математического аппарата, использовавшегося для моделирования и прогнозирования динамики COVID-19. Метод пригоден для моделирования, прогнозирования и оценки реального состояния динамики опасных вирусных заболеваний, включая COVID-19, и значительно упрощает и ускоряет процесс оценки результатов моделирования и их визуального анализа за счет использования явного аналитического решения модели SIR.

Ключевые слова: динамика опасных вирусных заболеваний, COVID-19, гамильтонов формализм, компартментальная модель SIR, многоволновая динамика, теория возмущений

Для цитирования: Биби́к Ю.В. Прогнозирование распространения опасных вирусных заболеваний с использованием гамильтонова формализма и фактических данных динамики COVID-19 // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 10–27. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-10-27>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4/0).

Original article

FORECASTING THE SPREAD OF DANGEROUS VIRAL DISEASES USING THE HAMILTONIAN FORMALISM AND FACTUAL DATA OF THE DYNAMICS OF COVID-19

Yuriy V. Bibik

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia

yvbibik@ccas.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3806-2501>

© Биби́к Ю.В., 2025

Abstract. The feasibility and effectiveness of using compartmental models to describe and predict the single-wave and multi-wave nature of the spread of dangerous viral diseases was investigated using an analytical method based on the Hamiltonian formalism and actual data on the dynamics of COVID-19. The proposed analytical method was developed using the explicit analytical solution of the original SIR model performed in the work to describe the single-wave and multi-wave dynamics of the epidemic process (in the form of a composition of single-wave solutions), and allows both using mathematical tools and visually assessing and monitoring the effectiveness of predicting the multi-wave dynamics of the disease. An explicit analytical solution of the SIR model is obtained by constructing the Hamiltonian of the model and inverting the implicit solution by the perturbation theory method with respect to the reference solution. The performance of the method was tested and confirmed by approximating official actual data on the dynamics of COVID-19 in Moscow and St. Petersburg for the period from 09/05/2023 to 04/30/2024. Mathematical results are presented graphically. The work provides a brief analysis of the features and problems of the mathematical apparatus used to model and forecast the dynamics of COVID-19. The method is suitable for modeling, forecasting and assessing the real state of the dynamics of dangerous viral diseases, including COVID-19, and significantly simplifies and speeds up the process of assessing modeling results and their visual analysis through the use of the explicit analytical solution of the SIR model obtained in the work.

Keywords: dynamics of dangerous viral diseases, COVID-19, Hamiltonian formalism, compartmental SIR model, multi-wave dynamics, perturbation theory

For citation: Bibik Yu.V. Forecasting the Spread of Dangerous Viral Diseases Using the Hamiltonian Formalism and Factual Data of the Dynamics of COVID-19. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):10-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-10-27>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4/0).

Введение

В работе представлен аналитический метод прогнозирования многоволнового распространения опасных вирусных заболеваний, разработанный с использованием гамильтонова формализма и фактических данных динамики COVID-19. Важность математического моделирования для оценки фактического состояния и прогнозирования распространения COVID-19 и других опасных вирусных заболеваний очевидна. В настоящее время возможности моделирования и прогнозирования COVID-19 ограничены тем, что в отношении большинства ключевых параметров сохраняется неопределенность, они находятся в стадии изучения. Знания об особенностях пандемии и вызывающем ее вирусе постоянно изменяются и пополняются. Ответы на фундаментальные вопросы пока не получены. Чрезвычайная ситуация первых лет COVID-19 стала испытательным полигоном для проверки надежности результатов моделирования и прогнозирования в постоянно изменяющихся реальных условиях. Она позволила накопить важный практический опыт, подлежащий тщательному изучению. Именно фактические данные, полученные на каждом из этапов исследования текущей пандемии, являются в настоящее время фундаментом для разработки новых подходов и более точных моделей для описания динамики COVID-19 и других опасных вирусных заболеваний. Как показала практика, при моделировании и прогнозировании динамики пандемии чаще всего использовались компартментальные модели SIR и их модификации [1–13], агентно-ориентированные [14–18], феноменологические [19–21], статистические модели [22–23], а также смешанные типы этих моделей. Ознакомление с результатами исследований, полученных в наиболее сложный период первых лет пандемии (включая отмеченные выше работы, а также [24–36]), позволяет определиться с первоочередными задачами и выбором стратегии моделирования и прогнозирования как текущей, так и новых вспышек. В [24] представлен широкий спектр моделей, с помощью которых получены важные для понимания динамики пандемии результаты, описаны направления моделирования, дана оценка предсказуемости моделей, представлена актуальная литература о стратегиях моделирования динамики COVID-19, проанализированы результаты использования моделирования при подборе и перепрофилировании существующих лекарств для лечения от COVID-19 и для создания вакцин. Результаты отмеченных исследований позволяют понять, как в процессе рас-

пространения заболевания менялись его основные индикаторы, почему они были разными в разных странах, в разных климатических условиях, как при этом отличались основные показатели, с какими выводами исследований можно согласиться, а какие требуют дополнительного изучения. В этих работах содержатся фактические данные, остро необходимые для прогнозирования в реальных условиях нагрузки на больницы и отделения интенсивной терапии (ОИТ). Особый интерес представляют статьи с моделями высокой точности прогнозирования загрузки больниц и ОИТ, когда высокая точность достигалась при наличии только простых обычных данных о поступающих пациентах [30], а также статьи с результатами использования в больничных условиях технологий искусственного интеллекта для своевременного выявления тяжелых осложнений COVID-19, приводящих к летальному исходу [32].

Проблемы точности прогнозирования динамики COVID-19, выявленные за первые годы пандемии

Исследования динамики распространения COVID-19, выполненные в условиях реального времени, высветили достоинства и недостатки моделей и методов, применявшихся в разных странах для прогнозирования количественных, временных и географических размеров пандемии. При использовании моделей на практике возникли вопросы точности прогнозирования, требующие дополнительного изучения и решения.

Одной из трудностей, значительно снижавших точность прогнозирования динамики COVID-19, было получение и интерпретация данных от внешних [19, 21] и внутренних источников [35]. В [35] приведен актуальный для всех стран развернутый анализ этой проблемы. Возможности привлечения цифровых технологий для решения вопроса, включая отслеживание поведенческих реакций людей в период пандемии, изучены в [33].

Основной проблемой, выявленной при использовании моделей в реальных условиях пандемии и требующей дополнительного исследования, является повышение точности прогностических возможностей различных типов моделей, использовавшихся при моделировании COVID-19. Мнение исследователей о прогностических возможностях различных типов моделей (например, о модели SEIR) расходятся, несмотря на то что компартментальная модель SEIR наиболее широко использовалась благодаря простоте, минимальному количеству параметров и способности хорошо оценивать масштабы пандемии. В [10] рассматривалась эффективность использования модели SEIR для отслеживания и прогнозирования динамики COVID-19. При этом сделан следующий вывод: «модели SEIR недооценивают долю населения, которая будет инфицирована, когда эпидемия находится на пике, и завышают продолжительность эпидемии в три и два раза соответственно». В [11] выполнена проверка пригодности модели SCIR (базовой модели SIR с дополнительным отсеком С для восприимчивых, но не инфицированных лиц, которые могут выйти из карантинных мер (например, люди, занятые в сферах жизнеобеспечения, таких как общественное питание, снабжение, здравоохранение, полиция)) для воспроизводства данных, полученных из официальных ежедневных отчетов Министерства здравоохранения Испании для всех испанских автономий. Главный вывод исследования – «прошлые данные модель воспроизводит хорошо, но предсказание будущего вводит в заблуждение и среднесрочному результату нельзя доверять» [11]. В [12] исследовались разнообразные модели (механистические, немеханистические и ансамблевые) из хранилища Центра по контролю и профилактике заболеваний США (CDC), чтобы выбрать из них лучшую модель для долгосрочного прогнозирования. Авторами была отобрана 61 модель. Все эти модели использовались для прогнозирования смертности от COVID-19 в США. Цель работы – выявление на первом этапе модели с лучшими прогностическими свойствами. На втором этапе – изучение факторов, влияющих на точность прогнозирования. В качестве лучшей выбрана модель SEIRb, которая «предлагает информативные прогнозы на срок до 20 недель вперед с точностью, сравнимой с лучшими моделями в наборе CDC». В [13] отмечается, что модель SEIR пригодна для прогнозирования локальных одноволновых вспышек. Анализируя успешный опыт сдерживания распространения инфекции в Китае, авторы отмечают, что развитие эпидемии всегда имеет многоволновой колебательный характер, обусловленный различными антропогенными источниками передачи, множественный характер которых не улавливается

моделью SEIR. Для успешного прогнозирования многоволновых широкомасштабных вспышек в работе предложен многоисточниковый метод динамического ансамблевого прогнозирования (multi-source dynamic ensemble prediction (MDEP)), базовой моделью которого является модель SEIR. Метод MDEP был применен для прогнозирования количества кумулятивных случаев вспышки COVID-19 в трех городах Китая. Анализировались эпидемиологические данные с 17 апреля 2022 г. по 12 августа 2022 г. Средние показатели точности прогнозирования методом MDEP с базовой моделью SEIR (в городах Пекине, Ланьчжоу и Бэйхае) составили 89,15; 91,74 и 94,97 % соответственно.

Неоднозначный характер результатов исследований, представленных в [10–13], показывает, что проблема точности прогнозирования динамики COVID-19 с использованием компартментальных (отсековых) моделей требует дополнительного изучения.

Описание предлагаемого аналитического метода прогнозирования распространения опасных вирусных заболеваний

Современный опыт подавления распространения коронавируса на месте его первого обнаружения в Китае [13] показал, что повышение трансмиссивности циркулирующих в настоящее время вариантов вируса COVID-19 приводит к тому, что прервать распространение заболевания (так же успешно, как на первых этапах пандемии) с помощью жесткого карантина не удастся. Распространение вируса приобретает многоволновой характер с угрозой возникновения очередной вспышки, значительно усложняя процесс моделирования и прогнозирования дальнейшего развития эпидемического процесса. Основными причинами изменения характера распространения заболевания в Китае названы резкое увеличение заразности новых вариантов вируса и повышенная мобильность населения.

Результаты моделирования и прогнозирования многоволновой динамики заболевания получены в [13, 36]. Практика использования математического моделирования и прогнозирования распространения вируса в Китае [13] показала, что компартментальные модели (SIR и ее модификации) хорошо описывают одноволновую динамику распространения инфекции на первых этапах эпидемии (до появления более заразных вариантов вируса), когда за счет своевременного введения жесткого карантина удастся вовремя прервать распространение инфекции и свести ее к одной волне. В [13, 36] для описания многоволновой динамики распространения пандемии используется композиция хорошо работающих одноволновых решений. Отличие заключается в том, что в [13] реализован численный метод прогнозирования, использующий в качестве базового уравнения модифицированную компартментальную модель SEIR с семью отсеками, а в [36] применен численный метод с использованием простого логистического уравнения Фейгенбаума. Как отмечено выше, в настоящее время мнения исследователей относительно эффективности использования компартментальных моделей (классическая модель SIR и ее модификации) для описания и прогнозирования динамики COVID-19 кардинально расходятся.

Цель настоящей работы – исследовать целесообразность и эффективность компартментальных моделей для описания и прогнозирования одноволнового и многоволнового характера распространения опасных вирусных заболеваний с помощью предложенного в статье независимого аналитического метода, использующего гамильтонов формализм.

Новизна работы – предложен новый (основанный на использовании гамильтонова формализма и явного аналитического решения модели SIR) метод прогнозирования опасных вирусных заболеваний, позволяющий как с использованием математического аппарата, так и визуально оценивать эффективность прогнозирования многоволнового эпидемического процесса.

Практическая значимость работы – метод пригоден для моделирования, прогнозирования и оценки реального состояния динамики опасных вирусных заболеваний, включая COVID-19, и удобен для анализа многоволновой динамики за счет явного аналитического решения модели SIR, которое значительно упрощает и ускоряет процесс оценки результатов моделирования и их визуального представления.

Ключевые шаги предлагаемого в работе аналитического метода прогнозирования многоволнового распространения опасных вирусных заболеваний представлены в следующих разделах.

Использование гамильтонова формализма для получения аналитического решения одноволновой модели SIR

В предлагаемом методе прогнозирования распространения опасных вирусных заболеваний в качестве исходной взята классическая модель SIR. Она выбрана из линейки компартментальных моделей в силу ее гамильтоновости. Использование гамильтонова формализма позволяет получить ее явное аналитическое решение, значительно упрощающее дальнейший процесс исследования и позволяющее непосредственно анализировать структуру решений. Как известно, классическая компартментальная (отсековая) эпидемиологическая модель SIR делит популяцию на три компартмента (отсека) – восприимчивых, инфицированных и выздоровевших.

Переменная S (susceptible/восприимчивые) описывает число восприимчивых к инфекции индивидуумов, они здоровые, незаразные, но могут заразиться, так как не имеют иммунитета; I (infected/инфицированные) обозначает число болеющих и заразных; R (recovered/выздоровевшие) описывает число выздоровевших, они незаразные и не могут заразиться, так как имеют иммунитет.

Модель SIR имеет вид

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI, \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I, \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I. \quad (3)$$

В формулы (1)–(3) входят два параметра: β определяет скорость распространения эпидемии; γ описывает скорость выздоровления. Перейдем к первому этапу получения аналитического решения модели SIR. Для этого выполним следующие шаги:

- на первом этапе вычислений уменьшим число входящих в систему параметров с двух до одного;
- на втором построим гамильтониан системы;
- на третьем (с использованием гамильтониана) получим неявное аналитическое решение модели SIR.

Для уменьшения числа входящих в систему параметров произведем замены:

$$t \rightarrow \beta t, \quad \gamma \rightarrow \gamma / \beta. \quad (4)$$

Рассмотрим гамильтонову структуру модели SIR. Из трех уравнений системы SIR отдельно берем первые два, поскольку уравнение (3) не влияет на их решение. Они представляют собой отдельную систему – гамильтонову. Гамильтониан H этой системы записывается в терминах канонических переменных $P = \ln S$ и $Q = \ln I$:

$$H = e^P + e^Q - \gamma P. \quad (5)$$

Формула (5) позволяет записать уравнения (1), (2) в гамильтоновой форме

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial Q} = -e^Q, \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial H}{\partial P} = e^P - \gamma. \quad (7)$$

С использованием гамильтониана (5) уравнения (6), (7) могут быть приведены к одному уравнению

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial Q} = e^P - \gamma P - H. \quad (8)$$

Таким образом, гамильтонова структура системы SIR позволяет свести ее к одному уравнению (8). Для полной определенности осталось вычислить значение гамильтониана H . Зададим для этого начальные условия

$$S(0) = e^{-R(0)/\gamma} = e^{-\varepsilon}. \quad (9)$$

Для определения значения переменной $I(0)$ воспользуемся формулой

$$S(0) + I(0) + R(0) = 1, \tag{10}$$

полученной из

$$\frac{d(S + I + R)}{dt} = 0.$$

Её справедливость следует из структуры системы SIR, которая предполагает, что суммарное количество восприимчивых, заболевших и выздоровевших не меняется. Из (9), (10) следует выражение для начального значения переменной $I(0)$: $I(0) = 1 - \gamma\varepsilon - e^{-\varepsilon}$.

Располагая начальными значениями переменных S и I , можно определить значение гамильтониана:

$$H = S(0) - \gamma \ln S(0) + I(0) = e^{-\varepsilon} + \gamma\varepsilon + 1 - \gamma\varepsilon - e^{-\varepsilon} = 1. \tag{11}$$

Подставим полученное значение гамильтониана (11) в (8). В итоге получим окончательный результат, представляющий собой единственное уравнение, к которому удалось свести систему SIR благодаря ее гамильтоновости:

$$\frac{dP}{dt} = e^P - \gamma P - 1. \tag{12}$$

В терминах переменной S формула (12) принимает вид

$$\frac{dS}{dt} = S(S - \gamma \ln S - 1). \tag{13}$$

Модель SIR удалось преобразовать к одному уравнению (13), которое допускает неявное точное аналитическое решение модели SIR вида

$$t(S) = - \int_S^{S_b} \frac{dS}{S(S - 1 - \gamma \ln S)}. \tag{14}$$

Выполнен первый шаг на пути получения явного аналитического решения классической модели SIR с помощью неявного точного аналитического решения. Для вычисления прямой зависимости количества восприимчивых индивидуумов от времени $S(t)$ необходимо обратить полученное в формуле (14) неявное аналитическое решение зависимости $t(S)$. Описание метода обращения представлено в следующем разделе.

Построение явного аналитического решения классической модели SIR в общем виде

Построение явного аналитического решения модели SIR в общем виде будет выполняться с учетом его дальнейшего использования для оценки эффективности и целесообразности моделирования, анализа и прогнозирования динамики одноволнового и многоволнового эпидемического процесса опасных вирусных заболеваний в условиях реального времени, включая возможность визуальной оценки.

Запишем уравнение (13) в общем виде

$$\frac{dx}{dt} = f(x). \tag{15}$$

Отметим, что уравнение (15) имеет обманчиво простой вид. Его правая часть имеет сложную нелинейную структуру, что затрудняет получение решения $x(t)$ необходимого вида. Для получения более простого вида решения используем разбиение процесса решения уравнения (15) на два этапа. Представим решение $x(t)$ уравнения (15) в виде композиции двух функций $x(x_0)$ и $x_0(t)$. Вместо (15) появляются два уравнения – одно для функции $x(x_0)$, второе для функции $x_0(t)$. Этот шаг дает большую свободу действий в поиске искомого решения за счет появления свободной функции $x_0(t)$. Здесь и далее будем ее называть эталонной, а уравнение, которому она удовлетворяет, – эталонным.

Будем искать $x(t)$ в виде зависимости $x(x_0)$ от эталонного решения $x_0(t)$, удовлетворяющего эталонному уравнению первого этапа

$$\frac{dx_0}{dt} = f_0(x_0). \quad (16)$$

Уравнение второго этапа для зависимости $x(x_0)$ следует из (15) и (16) и имеет вид

$$\frac{dx}{dx_0} = \frac{f(x)}{f_0(x_0)}. \quad (17)$$

Как будет показано ниже, разбиение процесса решения уравнения (15) на два этапа (с переходом от (15) и (16) к (17)) и введенная симметрия формы уравнений (15) и (16) дают возможность методом теории возмущений получить формулы из (17) (в первом порядке теории возмущений), значительно более простые, чем те, которые могли бы быть получены из (15).

Будем искать решение уравнения (17) методом теории возмущений относительно малого параметра $x_1 = x(t) - x_0(t)$. Предполагается, что правые части уравнений (15) и (16) близки в некоторой подходящей норме и поэтому x_1 мало. С точностью до слагаемых, квадратичных по x_1 , из (17) следует уравнение

$$\frac{dx_1}{dx_0} - \frac{f'(x_0)}{f_0(x_0)} x_1 = \frac{f(x_0)}{f_0(x_0)} - 1. \quad (18)$$

Для получения аналитического решения уравнения (18) заменим коэффициент $\frac{f'(x_0)}{f_0(x_0)}$ перед слагаемым x_1 в (18) на близкий (с точностью до членов второго порядка по x_1) $\frac{f'(x_0)}{f(x_0)}$. Получим уравнение

$$\frac{dx_1}{dx_0} - \frac{f'(x_0)}{f(x_0)} x_1 = \frac{f(x_0)}{f_0(x_0)} - 1. \quad (19)$$

Уравнение (19) – линейное, неоднородное. Оно решается в два этапа. На первом этапе будет получено решение однородного уравнения с точностью до некоторого коэффициента. На втором методом неопределенных коэффициентов строится решение неоднородного уравнения. Оно имеет вид

$$x_1 = f(x_0) \int_{x_0}^{x_b} \left(\frac{1}{f(x)} - \frac{1}{f_0(x)} \right) dx + Af(x_0). \quad (20)$$

Коэффициент перед решением однородного уравнения, входящего в (20), равен нулю в силу начального условия $x_1(x_b) = 0$. В итоге решение $x(x_0) = x_0 + x_1$ примет вид

$$x = x_0 + x_1 = x_0 + f(x_0) \int_{x_0}^{x_b} \left(\frac{1}{f(x)} - \frac{1}{f_0(x)} \right) dx. \quad (21)$$

В уравнение (21) входят два параметра: $t_1(x_0) = -\int_{x_0}^{x_b} \frac{dx}{f(x)}$ и $t(x_0) = -\int_{x_0}^{x_b} \frac{dx}{f_0(x)}$, представляю-

щие собой время перехода из начальной точки x_b в точку x_0 для исследуемой и эталонной систем соответственно. При этом функция $t_1(x)$ представляет собой неявное решение уравнения (13). Таким образом, с использованием метода теории возмущений удалось обратить зависимость $t_1(x)$ и получить зависимость $x(x_0(t)) = x(t)$ без явного обращения функции $t_1(x)$ с использованием самой неявной зависимости $t_1(x_0)$. Обращение указанной зависимости построено в общем виде и представлено формулой (21). Основными подходами, позволившими получить явное аналитическое решение модели SIR в общем виде, являются представление решения уравнения (15) в виде композиции двух функций, специально подобранная симметрия формы уравнений (15) и (16), приводящая к простому и обозримому результату, и применение метода теории возмущений. В следующем разделе перейдем к получению конкретного вида решения $x(t)$.

Окончательный вывод явного аналитического решения классической одноволновой модели SIR

Приступим к получению конкретного вида аналитического решения модели SIR. В формулу (21), представляющую в общем виде решение модели SIR, входят две функции – f и f_0 . Конкретизируем их вид и вид решения уравнения (21). Отметим, что интеграл t_1 , входящий в (21), не имеет явного аналитического выражения. Поэтому заменим его на максимально близкий к нему интеграл, имеющий явное аналитическое выражение. Переобозначим входящую до замены в интеграл t_1 функцию f на f_{sir} . Таким образом, в качестве основных объектов исследования далее будут рассматриваться три функции – f_{sir} , f и f_0 . Функция f_{sir} представляет собой правую часть уравнений (13) и (15), а f и f_0 являются аппроксимирующими функциями f_{sir} . Основным вклад в интегралы $-\int_{x_0}^{x_b} \frac{dx}{f_{sir}(x)}$, t_1 и t вносят полюса подынтегральных функций, поэтому особое внимание будет уделено положению нулей функций f_{sir} , f и f_0 . Эти нули должны совпадать. Функция f_{sir} имеет нули в точках 1 и λ , где параметр λ удовлетворяет уравнению $\lambda - 1 - \gamma \ln \lambda = 0$.

В качестве имеющих такие же нули и близкое к функции f_{sir} поведение выбраны функции $f_0 = \alpha(x - \lambda)(x - 1)$, $f = \frac{x(x - \lambda)(x - 1)}{ax + b}$.

Параметры a и b для функции f выбраны из условия наилучшей аппроксимации f_{sir} функцией f . Условие аппроксимации: $\frac{x(x - 1)(x - \lambda)}{(ax + b)x(x - 1 - \gamma \ln x)} = \frac{f}{f_{sir}} \Big|_{x=\lambda, 1} = 1$.

Интегралы t_1 и t вычисляются для функций f и f_0 в явном виде

$$t(x_0) = -\int_{x_0}^{x_b} \frac{dx}{\alpha(x - \lambda)(x - 1)} = -\frac{1}{\alpha(1 - \lambda)} \ln\left(\frac{1 - x}{x - \lambda}\right) \Big|_{x_0}^{x_b}, \quad (22)$$

$$t_1(x_0) = -\int_{x_0}^{x_b} \frac{(ax + b)dx}{x(x - 1)(x - \lambda)} = -\frac{1}{(1 - \lambda)} \ln\left(\frac{1 - x}{x}\right) \Big|_{x_0}^{x_b} - \frac{1}{(\lambda - \gamma)} \ln\left(\frac{x - \lambda}{x}\right) \Big|_{x_0}^{x_b}. \quad (23)$$

Эталонное решение $x_0(t)$ эталонного уравнения (16) получается из (22) и имеет вид

$$x_0 = \frac{\lambda + A}{1 + A}, \quad A = \frac{x_b - \lambda}{1 - x_b} e^{-\alpha(1 - \lambda)t}.$$

После подстановки интегралов (22), (23) в (21) получим аналитическое решение системы SIR в явном виде

$$x(t) = x_0 + f(x_0) \left[t + \ln\left(\left(\frac{1 - x_0}{x_0}\right)\left(\frac{x_0(0)}{1 - x_0(0)}\right)\right)^{\frac{1}{1 - \gamma}} \times \left(\left(\frac{x_0 - \lambda}{x_0}\right)\left(\frac{x_0(0)}{x_0(0) - \lambda}\right)\right)^{\frac{1}{\lambda - \gamma}} \right]. \quad (24)$$

Явное аналитическое решение для классической одноволновой системы SIR (24) удалось получить благодаря использованию гамильтонова формализма, метода теории возмущений, а также удачному выбору эталонного решения, входящего в (24) в виде x_0 . Для визуального анализа полученных результатов, кроме начального условия $x_b = x_0(0)$ (24), удобно использовать фазу волны φ , которая позволяет контролировать положение пика волны, записав решение x_0 в виде $x_0 = \frac{\lambda + e^{-\alpha(1 - \lambda)(t - \varphi)}}{1 + e^{-\alpha(1 - \lambda)(t - \varphi)}}$.

При этом начальное условие x_b связано с фазой ϕ соотношением $x_b = \frac{\lambda + e^{\alpha(1-\lambda)\phi}}{1 + e^{\alpha(1-\lambda)\phi}}$.

Таким образом, в данном разделе завершен окончательный вывод явного аналитического решения классической одноволновой модели SIR с подбором конкретных функций и вычислением интегралов, входящих в формулу общего вида (21). В следующем разделе представлена схема применения композиции одноволновых явных аналитических решений модели SIR для описания многоволновой динамики развития эпидемического процесса.

Использование композиции явных аналитических одноволновых решений модели SIR для описания многоволновой динамики опасных вирусных заболеваний

Для описания и прогнозирования многоволновой динамики COVID-19 и других опасных вирусных заболеваний применяем метод композиции аналитических одноволновых решений, основанный на использовании аналитического решения классической компартментальной модели SIR (24). Формула для описания многоволновой динамики записывается относительно кумулятивной численности инфицированных J и имеет вид

$$J = \sum_n N_n [1 - S_0(\beta_n, \gamma_n, \varphi_n, t) - f(S_0)(\beta_n t + \ln(((\frac{1-S_0}{S_0})(\frac{S_0(0)}{1-S_0(0)}))^{-\frac{1}{1-\gamma_n}} ((\frac{S_0-\lambda_n}{S_0})(\frac{S_0(0)}{S_0(0)-\lambda_n}))^{-\frac{1}{\lambda_n-\gamma_n}})]]. \quad (25)$$

Здесь N_n – емкость экологической ниши инфекции для волны n ; β_n – скорость передачи инфекции для волны n (включена в определение времени для одноволнового случая (формула (4)), но должна выписываться явно для многоволнового случая ввиду отличия параметров β_n для разных n); γ_n описывает отношение скорости передачи инфекции к скорости выздоровления для волны n ; φ_n – фаза волны n .

Для моделирования реального эпидемического процесса эти четыре параметра необходимо определить, основываясь на фактических данных, описывающих начальную стадию развития каждой волны. Ниже будет показано, что для определения параметров γ_n , φ_n , β_n , N_n достаточно знать фактические данные для четырех моментов времени, взятых в начале роста волны. Далее будут получены формулы, выражающие значения этих четырех параметров. Использование метода композиции одноволновых решений основано на отслеживании момента, когда фактические данные динамики заболевания начинают опережать предсказанную до этого кривую. В этот момент по набору характеристик новой волны необходимо определить ее свойства. Нужный набор характеристик зависит от выбранного способа аппроксимации волн. В предлагаемом варианте аппроксимации с использованием явного аналитического решения модели SIR необходимо в начале развития волны получить значения новой волны для четырех точек по оси времени. Для описания эпидемического процесса используем кумулятивную численность заболевших, обозначив ее переменной J . Она связана с численностью восприимчивых индивидуумов для каждой отдельной волны формулой

$$J^{(n)} + S^{(n)} = 1, \quad (26)$$

где индекс n – номер волны.

Входящие в формулу (26) переменные нормированы на единицу. Это означает, что $J^{(n)} = \frac{\bar{J}^{(n)}}{N_n}$, где $\bar{J}^{(n)}$ – фактическое значение количества заболевших в волне n ; N_n – нормирующий множитель, величина которого зависит от емкости экологической ниши для данной волны.

Суммарное значение кумулятивного числа заболевших с учетом всех волн будет иметь вид

$$J = \sum_n N_n J^{(n)}(\beta_n, \gamma_n, \varphi_n, t). \quad (27)$$

Формула (27) представляет собой другую запись (25), выраженную в терминах кумулятивного числа инфицированных. Входящая в (27) кумулятивная численность заболевших для волны n выражается через найденное в предыдущих разделах число восприимчивых индивидуумов для волны n по формуле

$$J^{(n)} = 1 - S^{(n)}. \quad (28)$$

Определим четыре параметра, входящие в (25) и (27). Для их определения используем приведенное ниже уравнение для кумулятивной численности заболевших, которое следует из формул (13), (28) и имеет вид

$$\frac{dJ}{dt} = S(1 - S + \gamma \ln S) = (1 - J)(J + \gamma \ln(1 - J)). \quad (29)$$

В (29) индекс n у кумулятивной численности заболевших J опущен для удобства. Поскольку для определения четырех параметров волны уравнение (29) будет использовано в области малых значений J (волна только начинается), удержим в (29) только члены до второго порядка по J . Получим упрощенную формулу

$$\frac{d \ln J}{dt} = \left[(1 - \gamma) - \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right)J + \frac{\gamma}{6}J^2 \right]. \quad (30)$$

Далее предположим, что нам известно значение новой волны в четырех точках: t_1, t_2, t_3, t_4 , разделенных интервалом. Кроме того, выделим явно входивший до этого в определение времени t параметр β (4) и опустим на данном этапе для упрощения формул индекс n у параметров β, γ, N . Из (30) получим уравнения для определения параметров β, γ, N :

$$\beta(1 - \gamma) = \frac{\ln(\bar{J}_2 / \bar{J}_1)}{\Delta t} = A, \quad (31)$$

$$\frac{\beta(1 - \frac{\gamma}{2})}{N} = \frac{1}{\bar{J}_2} \left[\frac{\ln(\bar{J}_2 / \bar{J}_1)}{\Delta t} - \frac{\ln(\bar{J}_3 / \bar{J}_2)}{\Delta t} \right] = B, \quad (32)$$

$$\frac{\gamma\beta}{N^2} = \frac{6}{(\bar{J}_3)^2} \left[\frac{\ln(\bar{J}_4 / \bar{J}_3)}{\Delta t} - \frac{\ln(\bar{J}_2 / \bar{J}_1)}{\Delta t} + \frac{\bar{J}_3}{\bar{J}_2} \left(\frac{\ln(\bar{J}_2 / \bar{J}_1)}{\Delta t} - \frac{\ln(\bar{J}_3 / \bar{J}_2)}{\Delta t} \right) \right] = C. \quad (33)$$

Уравнения (31)–(33) имеют следующие решения:

$$(\beta\gamma) = -2 \frac{B^2}{C} - 2A \pm \sqrt{4 \left(\frac{B^2}{C}\right)^2 - 8A \frac{B^2}{C}}. \quad (34)$$

$$\beta = A + (\beta\gamma), \quad (35)$$

$$N^2 = \frac{(\beta\gamma)}{C}. \quad (36)$$

Формула (34) дает два решения, по которым определяются два набора параметров β, γ, N . Наличие двух наборов решений уравнений (31) и (33) связано с заменой логарифма $\ln(1 - J)$ на полином в (29). Из этих двух наборов нужно выбрать тот, который точнее удовлетворяет неусеченному уравнению, вытекающему из (29) (после деления левой и правой частей (29) на J)

$$\frac{d \ln J}{dt} = \beta(1 - J - \gamma \ln(1 - J)) + \gamma \ln \frac{(1 - J)}{J}. \quad (37)$$

Например, для момента времени t_3 уравнение (37) примет вид

$$\frac{\ln(\bar{J}_4 / \bar{J}_3)}{\Delta t} = \beta \left(1 - \frac{\bar{J}_3}{N} - \gamma \ln \left(1 - \frac{\bar{J}_3}{N}\right)\right) + \gamma \ln \left(1 - \frac{\bar{J}_3}{N}\right) / (\bar{J}_3 / N).$$

Осталось определить фазу волны, которая определяется из уравнения

$$\begin{aligned} \frac{\bar{J}_4^{(n)}}{N_n} &= 1 - S^{(n)}(t_4, \varphi_n) = 1 - S_0(\beta_n, \gamma_n, \varphi_n, t_4) - f(S_0)[\beta_n t_4 + \ln((\frac{1-S_0}{S_0})(\frac{S_0(0)}{1-S_0(0)})^{\frac{1}{1-\gamma_n}}) \times \\ &\times ((\frac{S_0 - \lambda_n}{S_0})(\frac{S_0(0)}{S_0(0) - \lambda_n})^{\frac{1}{\lambda_n - \gamma_n}})]. \end{aligned} \quad (38)$$

Таким образом, с использованием фактических данных по кумулятивной численности заболевших $\bar{J}_1, \bar{J}_2, \bar{J}_3, \bar{J}_4$ завершено определение параметров $\beta_n, \gamma_n, \varphi_n$ и φ_n , входящих в (27), для волны n .

Следует отметить, что только после определения этих параметров предложенный в работе метод прогнозирования можно считать готовым к использованию. При этом основными формулами данного метода являются (24), (25), (34)–(36) и (38). Построение независимого аналитического метода моделирования и прогнозирования опасных вирусных заболеваний завершено.

В следующем разделе выполнена проверка эффективности метода путем аппроксимации многоволновой динамики коронавируса в г. Москве и г. Санкт-Петербурге за период с 05.09.2023 по 30.04.2024. Источники – официальные фактические данные по заболеваемости коронавирусом в Москве [37] и Санкт-Петербурге [38].

Результаты проверки метода путем аппроксимации фактических данных многоволновой динамики COVID-19

Результаты аппроксимации фактических данных многоволновой динамики COVID-19 в Москве и Санкт-Петербурге представлены в виде графиков (рис. 1–4). Обработка всех данных выполнена с использованием программы Matlab.

Полученные из официальных источников фактические данные представлены в виде параметров J_n , где n – номер недели.

По вертикальной оси для недели $n + 1$ отложена разность $J_{n+1} - J_n$, полученная с помощью соотношения

$$\frac{dJ}{dt} \Delta t = \frac{(J_{n+1} - J_n)}{\Delta t} \Delta t = J_{n+1} - J_n. \quad (39)$$

В (39) для большей наглядности графиков использована не сама кумулятивная численность инфицированных, а ее производная по времени. Расчетные данные приведены с учетом композиции аналитических одноволновых решений системы SIR и представлены на графиках с применением следующей формулы:

$$\frac{dJ}{dt} = \sum_n N_n \frac{dJ^{(n)}}{dt} = \sum_n N_n \left(\frac{-dS^{(n)}}{dt} \right) = \sum_n N_n S^{(n)} (1 - S^{(n)} + \gamma_n \ln S^{(n)}). \quad (40)$$

Вывод уравнения (40) выполнен с использованием (24), (27), (28). Формула (40) определяет не число восприимчивых, как (24), и не кумулятивное число инфицированных, как (25), а скорость прироста кумулятивного числа инфицированных индивидуумов.

На рис. 1 представлены фактические данные по динамике COVID-19 в Москве за период с 05.09.2023 по 30.04.2024 и аппроксимирующая фактические данные аналитическая кривая, построенная с использованием композиции одноволновых аналитических решений системы SIR. Фактическая динамика распространения COVID-19 в Москве имеет ярко выраженный многоволновой характер. При этом отчетливо видны три развитые волны и начало четвертой.

Первая волна имеет максимум 26.09.2023 с емкостью 110 тыс. заболевших. Вторая достигает максимума 05.12.2023 и имеет ёмкость 400 тыс. заболевших. Третья волна имеет максимум 03.02.2024 и ёмкость 190 тыс. заболевших. Четвертая только намечается.

Из рис. 1 видно, что полученная в данной работе аналитическая кривая с достаточной точностью аппроксимирует фактические данные заболеваемости COVID-19 в Москве.

На рис. 2 отдельно представлена каждая волна, входящая в многоволновое решение, использованное для аппроксимации фактических данных.

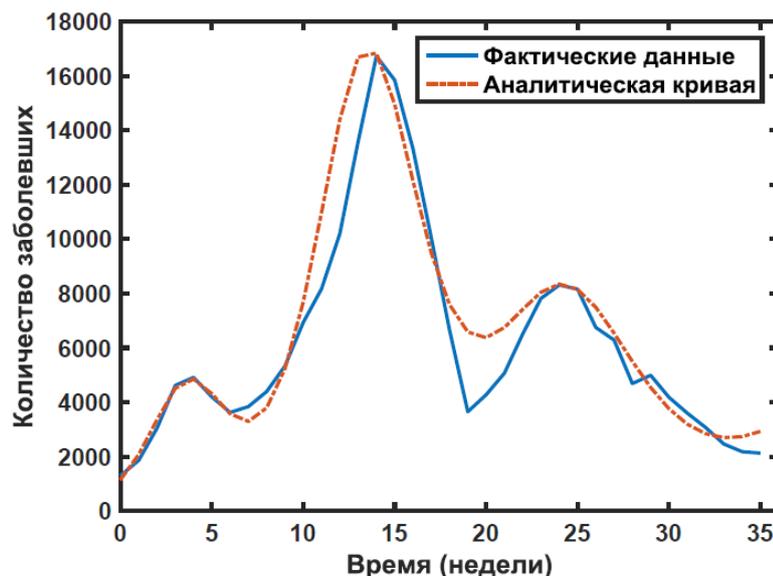


Рис. 1. Многоволновая динамика COVID-19 в г. Москве за период с 05.09.2023 по 30.04.2024 (сравнение фактических данных с аналитической кривой) / Fig. 1. Multi-wave dynamics of COVID-19 in Moscow for the period from 09/05/2023 to 04/30/2024 (comparison of actual data with the analytical curve)

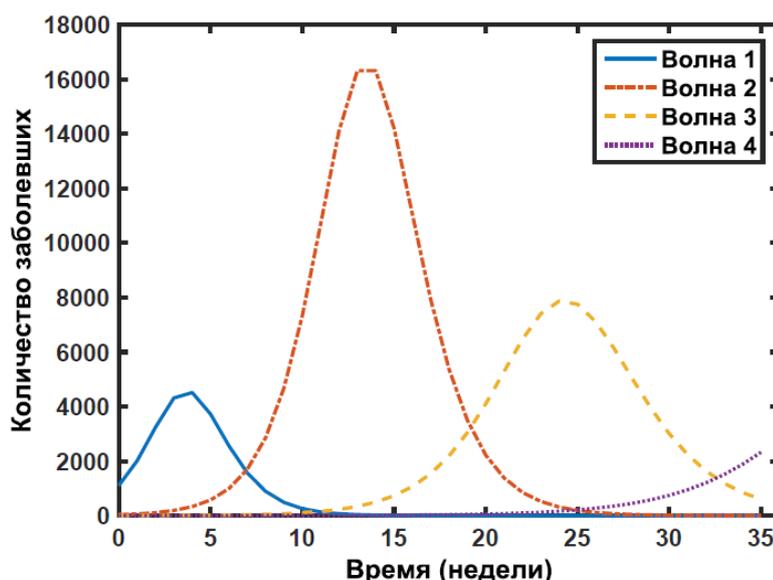


Рис. 2. Графики четырех отдельных волн динамики COVID-19 в г. Москве за период с 05.09.2023 по 30.04.2024 / Fig. 2. Graphs of four separate waves of COVID-19 dynamics in Moscow for the period from 09/05/2023 to 04/30/2024

На рис. 3 представлены фактические данные по заболеваемости COVID-19 в Санкт-Петербурге за период с 05.09.2023 по 30.04.2024 и аппроксимирующая фактические данные аналитическая кривая, полученная с использованием композиции одноволновых аналитических решений системы SIR. На рис. 4 можно видеть три ярко выраженные и две малозаметные волны. Максимум первой волны – 03.10.2023, ёмкость 40 тыс. заболевших. Максимум малозаметной второй волны – 31.10.2023, ёмкость 17 тыс. заболевших. Максимум ярко выраженной третьей волны – 12.12.2023, ёмкость 355 тыс. заболевших. Максимум четвертой приходится на 20.02.2024, ёмкость 70 тыс. заболевших. Максимум малозаметной пятой волны – 19.03.2024, ёмкость 23 тыс. заболевших COVID-19.

Как видно из рис. 3, аналитическая кривая хорошо аппроксимирует фактические данные заболеваемости COVID-19 в Санкт-Петербурге.

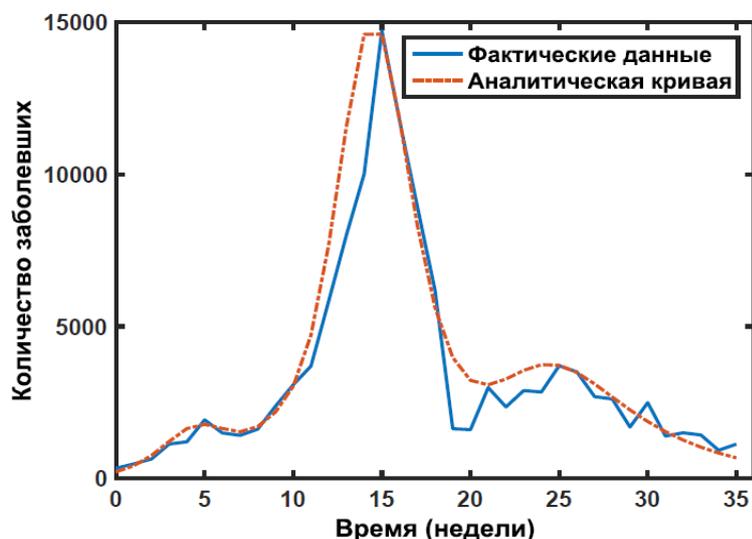


Рис. 3. График многоволновой динамики COVID-19 в г. Санкт-Петербурге за период с 05.09.2023 г. по 30.04.2024 г. (сравнение фактических данных с аналитической кривой) / Fig. 3. Graph of multi-wave dynamics of COVID-19 in St. Petersburg for the period from 09/05/2023 to 04/30/2024 (comparison of actual data with the analytical curve)

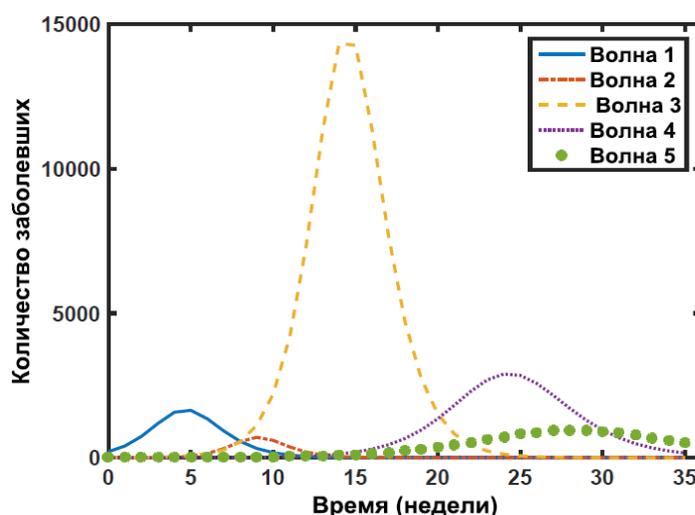


Рис. 4. Графики пяти отдельных волн динамики COVID-19 в г. Санкт-Петербурге за период с 05.09.2023 г. по 30.04.2024 г. / Fig. 4. Graphs of five separate waves of COVID-19 dynamics in St. Petersburg for the period from 09/05/2023 to 04/30/2024

На рис. 4 отдельно представлена каждая из пяти волн, входящих в многоволновое решение, использованное в данной работе для аппроксимации фактических данных. Визуальный анализ рис. 1–4 позволяет наглядно определить степень эффективности использования модели SIR при прогнозировании динамики COVID-19 и подтверждает целесообразность ее использования для прогнозирования развития эпидемических процессов опасных вирусных заболеваний. Степень эффективности математически обусловлена точностью исследуемой модели. Точность в данной работе установлена с помощью метода MSPE – Mean Squared Percentage Error (метод среднеквадратичной ошибки в процентах). При этом ошибка аппроксимации фактических данных аналитическими составила 4,93 для Москвы и 13,22 % для Санкт-Петербурга.

Заключение

1. Основные выводы по результатам исследования. Результаты работы подтверждают возможность и целесообразность использования компартментальных моделей для описания и прогнозирования одноволнового и многоволнового характера распространения опасных вирусных заболеваний, включая COVID-19. Исследование выполнено с помощью разработанного в статье независимого (ранее не применявшегося) аналитического метода с использованием гамильтонова формализма и фактических данных динамики COVID-19 (базовая модель SIR, построен гамильтониан, получено аналитическое решение модели SIR для одноволновой и многоволновой динамики). Результаты исследования проверены и подтверждены путем аппроксимации фактических данных динамики COVID-19 в Москве и Санкт-Петербурге и представлены на рис. 1–4. Предложенный в работе метод может быть использован для моделирования, прогнозирования и/или анализа реального положения с распространением опасных вирусных заболеваний, включая COVID-19. Следует отметить, что при современном уровне знаний об особенностях динамики заболевания единственным эффективным способом прогнозирования является постоянное отслеживание текущих фактических данных и постоянное внесение корректировок в параметры модели. Постоянное отслеживание необходимо для того, чтобы вовремя поймать признаки появления непредсказуемой новой волны и своевременно внести в модель соответствующие корректировки. Горизонт может быть разным и определяется временем от текущего момента до появления новой волны.

Преимущество предлагаемого метода состоит в том, что он допускает как грубый набросок общей ситуации с минимальными затратами усилий, так и возможное уточнение результатов при возрастающих затратах времени. Но эти затраты несравнимы с затратами машинного времени при использовании численных методов.

2. Краткий сравнительный анализ настоящего исследования с работами по аналогичной тематике. Исследования с аналогичной тематикой с использованием отслеживания новых волн выполнены в [13] и [36] с применением численного моделирования. Преимущество данного аналитического метода состоит в том, что для его реализации не нужны большие затраты машинного времени, а также наглядность результатов и представление ключевых решений в аналитическом виде в терминах элементарных функций, можно сразу оценить характерные особенности поведения системы и интуитивно проанализировать результаты.

3. Наиболее важные перспективные направления дальнейших исследований:

– разработка теории, метода, подхода (аналитический, численный, с использованием информационных технологий и/или комбинированный), раскрывающего сложную глубинную природу постоянно меняющейся динамики COVID-19 (включая механизмы возникновения и закономерности заболевания), который позволит повысить уровень защиты населения и использовать более эффективные методики моделирования и прогнозирования;

– глубокий и всесторонний анализ большого количества опубликованных в первые годы пандемии работ по моделированию и прогнозированию динамики COVID-19. Эти работы представляют собой ценный багаж, разумное использование которого позволит правильно определить первоочередные задачи моделирования и прогнозирования и повысить готовность к будущим вспышкам.

Список источников

1. *Wu J.* The application of SIR model in COVID-19 // TNS. 2023. Vol. 9, № 1. P. 38–44. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/9/20240709>
2. *Lourenço J., Paton R., Thompson C., Klenerman P., Gupta S.* Fundamental principles of epidemic spread highlight the immediate need for large-scale serological surveys to assess the stage of the SARS-CoV-2 epidemic // medRxiv preprint. 2020. 7 p. <https://doi.org/10.1101/2020.03.24.20042291>
3. *Moss R., Wood J. Brown D., Shearer F., Black A.J., Cheng A.C., McCaw J.M., McVernon J.* Modelling the impact of COVID-19 in Australia to inform transmission reducing measures and health system preparedness // medRxiv preprint. 2020. 17 p. <https://doi.org/10.1101/2020.04.07.20056184>
4. *Vallée A., Faranda D., Arutkin M.* COVID-19 epidemic peaks distribution in the United-States of America, from epidemiological modeling to public health policies // Sci. Rep. 2023. Vol. 13, № 4996. 8 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30014-2>

5. Lawson A.B., Kim J. Bayesian space-time SIR modeling of COVID-19 in two US states during the 2020–2021 pandemic // PLoS One. 2022. Vol. 17, № 12. Art. e0278515. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278515>
6. Bertozzi A.L., Franco E., Mohler G., Short M.B., Sledge D. The challenges of modeling and forecasting the spread of COVID-19 // PNAS. 2020. Vol. 117, № 29. P. 16732–16738. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006520117>.
7. Prem K., Liu Y., Russell T.W., Kucharski A.J., Eggo R.M., Davies N., Jit M., Klepac P. The effect of control strategies to reduce social mixing on outcomes of the COVID-19 epidemic in Wuhan, China: a modelling study // Lancet Publ. Health. 2020. Vol. 5, № 5. P. E261–E270. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(20\)30073-6](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(20)30073-6)
8. Zhu Y., Liu F., Bai Y., Zhao Z., Ma C., Wu A., Ning L., Nie X. Effectiveness analysis of multiple epidemic prevention measures in the context of COVID-19 using the SVIRD model and ensemble Kalman filter // Heliyon. 2023. Vol. 9, № 3. Art. e14231. P. 20. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14231>
9. IHME COVID-19 Forecasting Team. Modeling COVID-19 scenarios for the United States // Nature Medicine. 2021. Vol. 27, № 3. P. 94–105. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-1132-9>
10. Grant A. Dynamics of COVID-19 epidemics: SEIR models underestimate peak infection rates and overestimate epidemic duration // medRxiv preprint. 2020. 14 p. <https://doi.org/10.1101/2020.04.02.20050674>
11. Castro M., Ares S., Cuesta J.A., Manrubia S. The turning point and end of an expanding epidemic cannot be precisely forecast // PNAS. 2020. Vol. 117, № 42. P. 26190–26196. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007868117>
12. Rahmandad H., Xu R., Ghaffarzadegan N. Enhancing long-term forecasting: Learning from COVID-19 models // PLoS Comput. Biol. 2022. Vol. 18, № 5. Art. e1010100. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1010100>
13. Huang J., Zhao Y., Yan W., Lian X., Wang R., Chen B., Chen S. Multi-source dynamic ensemble prediction of infectious disease and application in COVID-19 case // J. of Thoracic Disease. 2023. Vol. 15, № 7. P. 4040–4052. <https://doi.org/10.21037/jtd-23-234>
14. Рыкованов Г.Н., Лебедев С.Н., Зацепин О.В., Каминский Г.Д., Карамов Э.В., Романюха А.А., Фейгин А.М., Четверушкин Б.Н. Агентный подход к моделированию эпидемии COVID-19 в России // Вестн. РАН. 2022. Т. 92, № 8. С. 747–755. <https://doi.org/10.31857/S0869587322080138>
15. Ferguson N.M., Laydon D. et al. Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand // Imperial College London. 2020. P. 20. <https://doi.org/10.25561/77482>
16. Chen K., Jiang X., Li Y., Zhou R. A stochastic agent-based model to evaluate COVID-19 transmission influenced by human mobility // Nonlinear Dyn. 2023. Vol. 111. P. 12639–12655. <https://doi.org/10.1007/s11071-023-08489-5>
17. Hinch R., Probert W.J.M., Nurtay A., Kendall M., Wymant C., Hall M. et al. OpenABM-Covid19-An agent-based model for non-pharmaceutical interventions against COVID-19 including contact tracing // PLoS Comput. Biol. 2021. Vol. 17, № 7. Art. e1009146. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009146>
18. Roubenoff E. How will COVID-19 persist in the future? Simulating future 2 dynamics of COVID-19 using an agent-based network model // medRxiv preprint. 2023. 41 P. <https://doi.org/10.1101/2023.08.29.23294791>
19. Roosa K., Lee Y., Luo R., Kirpich A., Rothenberg R., Hyman J.M., Yan P., Chowell G. Short-term Forecasts of the COVID-19 Epidemic in Guangdong and Zhejiang, China: February 13–23, 2020 // J. Clin. Med. 2020. Vol. 9, № 596. <https://doi.org/10.3390/jcm9020596>
20. Roosa K., Lee Y., Luo R., Kirpich A., Rothenberg R., Hyman J.M., Yan P., Chowell G. Real-time forecasts of the COVID-19 epidemic in China from February 5th to February 24th, 2020 // Infect. Dis. Model. 2020. Vol. 5. P. 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.02.002>
21. Wu K., Darcet D., Wang Q., Sornette D. Generalized logistic growth modeling of the COVID-19 outbreak: comparing the dynamics in the 29 provinces in China and in the rest of the world // Nonlinear Dyn. 2020. Vol. 101, № 3. P. 1561–1581. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05862-6>
22. IHME COVID-19 health service utilization forecasting team, Murray C.J. Forecasting COVID-19 impact on hospital bed-days, ICU-days, ventilator-days and deaths by US state in the next 4 months // medRxiv preprint. 2020. 26 p. <https://doi.org/10.1101/2020.03.27.20043752>
23. Ritter M., Ott D.V.M., Paul F., Haynes J.-D., Ritter K. COVID-19: a simple statistical model for predicting intensive care unit load in exponential phases of the disease // Sci. Rep. 2021. Vol. 11, № 5018. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83853-2>
24. Estrada E. COVID-19 and SARS-CoV-2. Modeling the present, looking at the future // Physics Reports. 2020. Vol. 869. P. 1–51. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.07.005>
25. Imai N., Dorigatti I., Cori A., Donnelly C., Riley S., Ferguson N.M. Report 2: Estimating the potential total number of novel Coronavirus cases in Wuhan City, China // Imperial College London. 2020. Jan. 22. P. 1–7. <https://doi.org/10.25561/77150>
26. Dorigatti I., Okell L., Cori A. et al. Report 4: Severity of 2019-novel coronavirus (nCoV) // Imperial College London. 2020. Feb. 10. P. 1–14. <https://doi.org/10.25561/77154>
27. Tan W., Zhao X., Ma X., Wang W., Niu P., Xu W., Gao G.F., Wu G. A novel coronavirus genome identified in a cluster of pneumonia cases – Wuhan, China 2019–2020 // China CDC Weekly. 2020. Vol. 2, № 4. P. 61–62. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2020.017>

28. Kucharski A.J., Russell T.W., Diamond C., Liu Y., Edmunds J., Funk S., Eggo R.M. Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modeling study // *Lancet Infectious Diseases*. 2020. Vol. 20, № 5. P. 553–558. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30144-4](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30144-4)
29. Petersen E., Koopmans M., Go U., Hamer D.H., Petrosillo N., Castelli F., Storgaard M., Khalili S.A., Simonsen L. Comparing SARS-CoV-2 with SARS-CoV and influenza pandemics // *Lancet Infect. Dis*. 2020. Vol. 20, № 9. P. E238–E244. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30484-9](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30484-9)
30. Roimi M., Gutman R. et al. Development and validation of a machine learning model predicting illness trajectory and hospital utilization of COVID-19 patients – a nationwide study // *J. of the American Medical Informatics Association*. 2021. Vol. 28, № 6. P. 1188–1196. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocab005>
31. Abate S.M., Ali A.S., Mantfardo B., Basu B. Rate of Intensive Care Unit admission and outcomes among patients with coronavirus: A systematic review and meta-analysis // *PLoS ONE*. 2020. Vol. 15, № 7. Art. e0235653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235653>
32. Jiang X., Coffey M. et al. Towards an artificial intelligence framework for data-driven prediction of coronavirus clinical severity // *Computers, Materials & Continua*. 2020. Vol. 63, № 1. P. 537–551. <https://doi.org/10.32604/cmc.2020.010691>
33. Kogan N.E., Clemente L., Liautaud P. et al. An early warning approach to monitor COVID-19 activity with multiple digital traces in near real time // *Sci. Adv*. 2021. Vol. 7, № 10. P. 15. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd6989>
34. McDonald D. J., Bien J. et al. Can auxiliary indicators improve COVID-19 forecasting and hotspot prediction? // *PNAS*. 2021. Vol. 118, № 51. Art. e2111453118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111453118>
35. Steinberg D.M., Balicer R.D., Benjamini Y., De-Leon H., Gazit D., Rossman H., Sprecher E. The role of models in the COVID-19 pandemic // *Isr. J. Health Policy Res*. 2022. Vol. 11, № 36. <https://doi.org/10.1186/s13584-022-00546-5>
36. Куркина Е.С., Кольцова Э.М. Математическое моделирование распространения волн эпидемии коронавируса COVID-19 в разных странах мира // *Прикладная математика и информатика*. 2021. Т. 66. С. 46–79. EDN: FNZXQV.
37. Коронавирус в Москве. URL: <https://coronavirus-monitor.info/country/russia/moskva/> (дата обращения: 30.04.2024).
38. Коронавирус в Санкт-Петербурге. URL: <https://coronavirus-graph.ru/rossiya/sankt-peterburg> (дата обращения: 30.04.2024).

References

1. Wu J. The application of SIR model in COVID-19. *TNS*. 2023;9(1):38-44. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/9/20240709>
2. Lourenço J., Paton R., Thompson C., Klenerman P., Gupta S. Fundamental principles of epidemic spread highlight the immediate need for large-scale serological surveys to assess the stage of the SARS-CoV-2 epidemic. *MedRxiv Preprint*. 2020:7. <https://doi.org/10.1101/2020.03.24.20042291>
3. Moss R., Wood J., Brown D., Shearer F., Black A.J., Cheng A.C., McCaw J.M., McVernon J. Modelling the impact of COVID-19 in Australia to inform transmission reducing measures and health system preparedness. *MedRxiv Preprint*. 2020:17. <https://doi.org/10.1101/2020.04.07.20056184>
4. Vallée A., Faranda D., Arutkin M. COVID-19 epidemic peaks distribution in the United-States of America, from epidemiological modeling to public health policies. *Sci. Rep*. 2023;13:4996. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30014-2>
5. Lawson A.B., Kim J. Bayesian space-time SIR modeling of COVID-19 in two US states during the 2020–2021 pandemic. *PLoS One*. 2022;17(12):e0278515. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278515>
6. Bertozzi A.L., Franco E., Mohler G., Short M.B., Sledge D. The challenges of modeling and forecasting the spread of COVID-19. *PNAS*. 2020;117(29):16732-16738. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006520117>
7. Prem K., Liu Y., Russell T.W., Kucharski A.J., Eggo R.M., Davies N., Jit M., Klepac P. The effect of control strategies to reduce social mixing on outcomes of the COVID-19 epidemic in Wuhan, China: a modelling study. *Lancet Publ. Health*. 2020;5(5):E261-E270. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(20\)30073-6](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(20)30073-6)
8. Zhu Y., Liu F., Bai Y., Zhao Z., Ma C., Wu A., Ning L., Nie X. Effectiveness analysis of multiple epidemic prevention measures in the context of COVID-19 using the SVIRD model and ensemble Kalman filter. *Heliyon*. 2023;9(3):e14231. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14231>
9. IHME COVID-19 Forecasting Team. Modeling COVID-19 scenarios for the United States. *Nature Medicine*. 2021;27:94-105. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-1132-9>
10. Grant A. Dynamics of COVID-19 epidemics: SEIR models underestimate peak infection rates and overestimate epidemic duration. *MedRxiv Preprint*. 2020:14. <https://doi.org/10.1101/2020.04.02.20050674>
11. Castro M., Ares S., Cuesta J.A., Manrubia S. The turning point and end of an expanding epidemic cannot be precisely forecast. *PNAS*. 2020;117(42):26190-26196. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007868117>

12. Rahmandad H., Xu R., Ghaffarzadegan N. Enhancing long-term forecasting: Learning from COVID-19 models. *PLoS Comput. Biol.* 2022;18(5):e1010100. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1010100>
13. Huang J., Zhao Y., Yan W., Lian X., Wang R., Chen B., Chen S. Multi-source dynamic ensemble prediction of infectious disease and application in COVID-19 case. *Journal of Thoracic Disease.* 2023;15(7):4040-4052. <https://doi.org/10.21037/jtd-23-234>
14. Rykovanov G.N., Lebedev S.N., Zatsepin O.V., Kaminskii G.D., Karamov E.V., Romanyukha A.A., Feigin A.M., Chetverushkin B.N. Agent-Based Simulation of the COVID-19 Epidemic in Russia. *Her. Russ. Acad. Sci.* 2022;92(4):479-487. <https://doi.org/10.1134/S1019331622040219>
15. Ferguson N.M., Laundon D. et al. Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. *Imperial College London.* 2020. 20 p. <https://doi.org/10.25561/77482>
16. Chen K., Jiang X., Li Y., Zhou R. A stochastic agent-based model to evaluate COVID-19 transmission influenced by human mobility. *Nonlinear Dyn.* 2023;111:12639-12655. <https://doi.org/10.1007/s11071-023-08489-5>
17. Hinch R., Probert W.J.M., Nurtay A., Kendall M., Wymant C., Hall M. et al. OpenABMCovid19 - An agent-based model for non-pharmaceutical interventions against COVID-19 including contact tracing. *PLoS Comput. Biol.* 2021;17(7):e1009146. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009146>
18. Roubenoff E. How will COVID-19 persist in the future? Simulating future 2 dynamics of COVID-19 using an agent-based network model. *MedRxiv Preprint.* 2023:41. <https://doi.org/10.1101/2023.08.29.23294791>
19. Roosa K., Lee Y., Luo R., Kirpich A., Rothenberg R., Hyman J.M., Yan P., Chowell G. Short-term Forecasts of the COVID-19 Epidemic in Guangdong and Zhejiang, China: February 13-23, 2020. *J. Clin. Med.* 2020;9(2):596. <https://doi.org/10.3390/jcm9020596>
20. Roosa K., Lee Y., Luo R., Kirpich A., Rothenberg R., Hyman J.M., Yan P., Chowell G. Real-time forecasts of the COVID-19 epidemic in China from February 5th to February 24th, 2020. *Infect. Dis. Model.* 2020;5:256-263. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.02.002>
21. Wu K., Darcet D., Wang Q., Sornette D. Generalized logistic growth modeling of the COVID-19 outbreak: comparing the dynamics in the 29 provinces in China and in the rest of the world. *Nonlinear Dyn.* 2020;101(3):1561-1581. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05862-6>
22. IHME COVID-19 health service utilization forecasting team, Murray C.J. Forecasting COVID-19 impact on hospital bed-days, ICU-days, ventilator-days and deaths by US state in the next 4 months. *MedRxiv Preprint.* 2020:26. <https://doi.org/10.1101/2020.03.27.20043752>
23. Ritter M., Ott D.V.M., Paul F., Haynes J.-D., Ritter K. COVID-19: a simple statistical model for predicting intensive care unit load in exponential phases of the disease. *Sci. Rep.* 2021;11:5018. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83853-2>
24. Estrada E. COVID-19 and SARS-CoV-2. Modeling the present, looking at the future. *Physics Reports.* 2020;869:1-51. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.07.005>
25. Imai N., Dorigatti I., Cori A., Donnelly C., Riley S., Ferguson N.M. Report 2: Estimating the potential total number of novel Coronavirus cases in Wuhan City, China. *Imperial College London (22-01-2020):1-7.* <https://doi.org/10.25561/77150>
26. Dorigatti I., Okell L., Cori A. et al. Report 4: Severity of 2019-novel coronavirus (nCoV). *Imperial College London (10-02-2020):1-14.* <https://doi.org/10.25561/77154>
27. Tan W., Zhao X., Ma X., Wang W., Niu P., Xu W., Gao G.F., Wu G. A novel coronavirus genome identified in a cluster of pneumonia cases - Wuhan, China 2019-2020. *China CDC Weekly.* 2020;2(4):61-62. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2020.017>
28. Kucharski A.J., Russell T.W. Diamond C., Liu Y., Edmunds J., Funk S., Eggo R.M. Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study. *Lancet Infect. Dis.* 2020;20(5):553-558. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30144-4](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30144-4)
29. Petersen E., Koopmans M., Go U., Hamer D.H., Petrosillo N., Castelli F., Storgaard M., Khalili S.A., Simonsen L. Comparing SARS-CoV-2 with SARS-CoV and influenza pandemics. *Lancet Infect. Dis.* 2020;20(9):E238-E244. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30484-9](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30484-9)
30. Roimi M., Gutman R. et al. Development and validation of a machine learning model predicting illness trajectory and hospital utilization of COVID-19 patients: a nationwide study. *J. of the American Medical Informatics Association.* 2021;28(6):1188-1196. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocab005>
31. Abate S.M., Ali A.S., Mantfardo B., Basu B. Rate of Intensive Care Unit admission and outcomes among patients with coronavirus: A systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE.* 2020;15(7):e0235653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235653>
32. Jiang X., Coffee M. et al. Towards an artificial intelligence framework for data-driven prediction of coronavirus clinical severity. *Computers, Materials & Continua.* 2020;63(1):537-551. <https://doi.org/10.32604/cmc.2020.010691>
33. Kogan N.E., Clemente L., Liautaud P. et al. An early warning approach to monitor COVID-19 activity with multiple digital traces in near real time. *Sci. Adv.* 2021;7(10):15. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd6989>

34. McDonald D.J., Bien J. et al. Can auxiliary indicators improve COVID-19 forecasting and hotspot prediction? *PNAS*. 2021;118(51):e2111453118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111453118>

35. Steinberg D.M., Balicer R.D., Benjamini Y., De-Leon H., Gazit D., Rossman H., Sprecher E. The role of models in the Covid-19 pandemic. *Isr. J. Health Policy Res.* 2022;11:36. <https://doi.org/10.1186/s13584-022-00546-5>

36. Kurkina E.S., Koltsova E.M. Mathematical modeling of the spread of waves of the COVID-19 coronavirus epidemic in different countries of the world. *Computational Mathematics and Modeling*. 2021;66:46-79. (In Russ.). EDN: FNZXQV.

37. *Coronavirus in Moscow*. Available from: <https://coronavirus-monitor.info/country/russia/moskva/> [Accessed 30th April 2024]. (In Russ.).

38. *Coronavirus in St. Petersburg*. Available from: <https://coronavirus-graph.ru/rossiya/sankt-peterburg> [Accessed 30th April 2024]. (In Russ.).

Информация об авторе

Ю.В. Бибик – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, отдел механики сплошных сред, ФИЦ ИУ РАН.

Information about the author

Yu.V. Bibik – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Department of Continuum Mechanics, FRC CSC RAS.

Статья поступила в редакцию 20.08.2024; одобрена после рецензирования 30.09.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 20.08.2024; approved after reviewing 30.09.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 517.958, 531.553, 615.849.11

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-28-39>

ЗАДАЧА КОШИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

Вероника Андреевна Гетман¹, Татьяна Федоровна Долгих²

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

¹ vagetman@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3523-5428>

² dolgikh@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8102-1181>

Аннотация. Методом годографа на основе закона сохранения решена задача Коши в случае плоской электромагнитной волны, распространяющейся в анизотропной среде. Для описания поведения волны использованы уравнения Максвелла для анизотропной среды при отсутствии токов и свободных зарядов, что в случае плоской волны приводит к системе двух пространственно-одномерных однородных квазилинейных уравнений в частных производных первого порядка. Анизотропность среды учитывается нелинейными определяющими соотношениями для электрической и магнитной индукции, зависящими, соответственно, от напряжённости электрического и магнитного поля, в которых, в отличие от изотропной среды, сохранены квадратичные члены. Система квазилинейных уравнений приводится к инвариантам Римана и методом годографа на основе закона сохранения трансформируется в одно линейное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка с переменными коэффициентами. В некотором специальном случае определяющих соотношений для линейного уравнения построена функция Римана – Грина, что позволяет записать точное решение задачи Коши в неявной форме, а затем на линиях уровня неявного решения построить явное решение путём численного интегрирования задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Представлены результаты расчётов для различных пространственно-периодических начальных данных. Численно определены моменты времени, при которых возможно возникновение ударных волн. Задача является одной из моделей, описывающей некоторые эффекты нелинейной оптики в одномерном волноводе.

Ключевые слова: метод годографа, плоские электромагнитные волны, анизотропная среда

Для цитирования: Гетман В.А., Долгих Т.Ф. Задача Коши для описания поведения плоской электромагнитной волны в анизотропной среде // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 28–39. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-28-39>

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

Original article

CAUCHY PROBLEM FOR DESCRIBING THE BEHAVIOR OF A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE IN AN ANISOTROPIC MEDIUM

Veronika A. Getman¹, Tatiana F. Dolgikh²

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

¹ vagetman@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3523-5428>

² dolgikh@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8102-1181>

Abstract. The Cauchy problem is solved by the hodograph method based on the conservation law in the case of a plane electromagnetic wave propagating in an anisotropic medium. To describe the behavior of the wave, Maxwell's equations for an anisotropic medium in the absence of currents and free charges are used, which in the case of a plane wave leads to a system of two spatially one-dimensional homogeneous quasi-linear partial

© Гетман В.А., Долгих Т.Ф., 2025

differential equations of the first order. The anisotropy of the medium is taken into account by nonlinear constitutive relations for electric and magnetic induction, depending, respectively, on the strength of the electric and magnetic fields, in which, in contrast to the isotropic medium, quadratic terms are saved. The system of quasi-linear equations is reduced to Riemann invariants, and is transformed by the hodograph method based on the conservation law into one linear differential equation in second-order partial derivatives with variable coefficients. In some special case of defining relations for a linear equation, the Riemann-Green function is constructed, which allows us to write the exact solution of the Cauchy problem in implicit form, and then, on the level lines of the implicit solution, to construct an explicit solution by numerical integration of the Cauchy problem for a system of ordinary differential equations. The results of calculations for various initial spatially periodic data are presented. The time points at which shock waves may occur are numerically determined. In fact, the problem presented is one of the models describing some effects of nonlinear optics in a one-dimensional waveguide.

Keywords: hodograph method, plane electromagnetic waves, anisotropic medium

For citation: Dolgikh T.F., Getman V.A. Cauchy Problem for Describing the Behavior of a Plane Electromagnetic Wave in an Anisotropic Medium. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):28-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-28-39>

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

Введение

Рассмотрена одна из моделей нелинейной оптики, описывающих распространение плоской электромагнитной волны в нелинейной анизотропной среде. Особенностью модели является учёт квадратичной восприимчивости χ в уравнении состояния для поляризации $\mathbf{P} = \kappa\mathbf{E} + \chi:\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots$, которое связывает поляризацию \mathbf{P} и напряжённость электрического поля \mathbf{E} . В изотропной среде определяющее соотношение включает в себя лишь нечётные степени \mathbf{E} , а квадратичные члены возникают либо в анизотропной среде, либо при нелинейных (трехфотонных) взаимодействиях при большой интенсивности электромагнитной волны, например при лазерном излучении [1, с. 15–20; 2, с. 23; 3, с. 23].

С математической точки зрения задача заключается в исследовании системы двух гиперболических квазилинейных уравнений в частных производных первого порядка, точнее, в решении задачи Коши для этих уравнений. В нелинейной оптике задачи с начальными данными, ввиду их сложности, рассматриваются достаточно редко. Однако именно решение задачи Коши позволяет ответить на вопрос об эволюции начального распределения электромагнитного поля и определить момент времени, при котором из гладких начальных данных возникают разрывы решения (ударные волны). Заметим, что задача об определении момента возникновения ударной волны в случае учёта квадратичной нелинейности в определяющем соотношении для поляризации частично исследована в [4, 5]. Для решения задачи в [4] использован классический вариант метода годографа [6, с. 33, 34], задача Коши не рассматривалась, а для получения окончательного результата использовались идеи из [7]. Интересно отметить, что много позже результаты работы [7] были применены для определения асимптотики значения момента возникновения ударных волн в задаче о поведении конденсата Бозе – Эйнштейна (в бездисперсионном приближении) и задачи о нелинейном оптическом материале [8–10].

В представленной работе задача Коши о поведении плоской электромагнитной волны в анизотропной среде решена при помощи метода годографа на основе закона сохранения. Указанный метод первоначально предложен в [11], модифицирован и существенно развит в [12], а также эффективно использован для решения ряда задач электрофореза, мелкой воды и др. в [13–22] в случае как гиперболических, так и эллиптических уравнений. В [19] показано, что классический, обобщенный метод годографа [23] и метод годографа на основе закона сохранения эквивалентны, однако последний является более прозрачным и гибким. Метод позволяет трансформировать систему двух квазилинейных уравнений в частных производных

первого порядка (гиперболического или эллиптического типа) в одно линейное уравнение в частных производных второго порядка, а затем преобразовать решение задачи Коши для квазилинейных уравнений к задаче Коши для некоторой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Ключевую роль для эффективного использования метода играет наличие явного выражения для функции Римана – Грина соответствующего линейного уравнения, а также возможность указать явную (обратимую) зависимость между переменными исходной задачи и инвариантами Римана, которые для системы двух уравнений всегда существуют. Отметим, что для задачи о поведении плоской электромагнитной волны при некоторых специальных определяющих соотношениях для индукции электрического и магнитного полей оба этих условия выполнены. Предлагаемый метод решения является точным – не используются никакие аппроксимации, исходные уравнения типичные для конечно-разностных методов, методов конечных элементов и конечных объёмов. Численно требуется интегрировать лишь задачу Коши для системы обыкновенных уравнений, и погрешности обусловлены точностью решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Основные уравнения и постановка задачи

Для описания поведения электромагнитной волны используем уравнения Максвелла в среде при отсутствии электрических токов и свободных зарядов

$$\mathbf{D}_t - \text{rot } \mathbf{H} = 0, \quad \mathbf{B}_t + \text{rot } \mathbf{E} = 0, \quad \text{div } \mathbf{D} = 0, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

с определяющими соотношениями

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}(\mathbf{E}), \quad \mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{H}). \quad (2)$$

Здесь \mathbf{E} , \mathbf{H} – напряжённости электрического и магнитного полей; \mathbf{D} , \mathbf{B} – электрическая и магнитная индукция.

В случае плоской волны

$$\mathbf{D} = (D, 0, 0), \quad \mathbf{B} = (0, B, 0), \quad \mathbf{E} = (E, 0, 0), \quad \mathbf{H} = (0, H, 0) \quad (3)$$

уравнения (1) и определяющие соотношения (2) принимают вид

$$D_t + H_x = 0, \quad B_t + E_x = 0, \quad (4)$$

$$D = D(E), \quad B = B(H), \quad (5)$$

где x – направление, перпендикулярное плоскости распространения волны.

Для анизотропной среды в качестве определяющих соотношений возьмём

$$D = \varepsilon \left(E + \frac{1}{2} \eta E^2 \right), \quad B = \mu \left(H + \frac{1}{2} \xi H^2 \right), \quad (6)$$

где ε , μ – электрическая и магнитная проницаемость; η , ξ – коэффициенты, характеризующие анизотропность среды.

Обратим внимание на то, что зависимости вида (6) возможны лишь в анизотропных средах. В изотропной среде члены, содержащие чётные степени E или H , отсутствуют. Конечно же, выбор соотношений (5) в форме (6) является простейшим вариантом учёта физических нелинейностей среды (поляризации и намагничённости).

Количество параметров задачи ε , μ , ξ , η путём замен переменных может быть сокращено до одного. По крайней мере «безболезненно» можно исключить параметры ε , μ , используя масштабирование

$$H \rightarrow \frac{H}{\sqrt{\mu}}, \quad E \rightarrow \frac{E}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad x \rightarrow \frac{x}{\sqrt{\varepsilon\mu}}. \quad (7)$$

Параметры ξ , η желательно сохранять, так как это позволяет строить асимптотику при $\xi \rightarrow 0$, $\eta \rightarrow 0$.

Основная цель работы – построение решения задачи Коши для квазилинейных гиперболических уравнений, полученных из (4) подстановкой соотношений (6)

$$H_t + \frac{1}{\mu(1+\xi H)} E_x = 0, \quad E_t + \frac{1}{\varepsilon(1+\eta E)} H_x = 0 \quad (8)$$

с начальными данными

$$E|_{t=0} = E_0(x), \quad H|_{t=0} = H_0(x), \quad (9)$$

где $E_0(x)$, $H_0(x)$ – известные функции.

Во избежание недоразумений ещё раз отметим, что уравнения вида (8) рассматривались в [4] при $\xi = 0$. В указанной работе преследовалась цель отыскания критического момента времени, при котором происходит опрокидывание плоской волны, но полное решение задачи Коши (8), (9) не построено.

Инварианты Римана

Задача (8), (9) допускает запись в инвариантах Римана [6, с. 27–31]

$$R_t^1 + \lambda^1 R_x^1 = 0, \quad R_t^2 + \lambda^2 R_x^2 = 0, \quad (10)$$

$$R^1|_{t=0} = R_0^1(x), \quad R^2|_{t=0} = R_0^2(x), \quad (11)$$

где $R^1(x, t)$, $R^2(x, t)$, $R_0^1(x)$, $R_0^2(x)$ – инварианты Римана и их начальные значения при $t = 0$; $\lambda^1(R^1, R^2)$, $\lambda^2(R^1, R^2)$ – характеристические направления (отметим, что верхние индексы – это номера инвариантов Римана, а не их степени).

В общем случае определяющих соотношений (5) значения λ^1 , λ^2 задаются формулами

$$\lambda^1 = -\frac{1}{\sqrt{D'(E)B'(H)}}, \quad \lambda^2 = \frac{1}{\sqrt{D'(E)B'(H)}}, \quad (12)$$

а связь между R^1 , R^2 и исходными переменными E , H задаётся дифференциальными формами [4; 6, с. 27–31]

$$dR^1 = \sqrt{B'(H)} dH - \sqrt{D'(E)} dE, \quad dR^2 = \sqrt{B'(H)} dH + \sqrt{D'(E)} dE. \quad (13)$$

Формальное интегрирование дифференциальных форм (13) позволяет легко получить зависимости инвариантов Римана от исходных переменных $R^1 = R^1(E, H)$, $R^2 = R^2(E, H)$. Однако обратные зависимости $E = E(R^1, R^2)$, $H = H(R^1, R^2)$, необходимые для подстановки в (12) с целью определения функций $\lambda^1(R^1, R^2)$, $\lambda^2(R^1, R^2)$, получить в явной форме (не требующей решения систем уравнений) удаётся лишь в частных случаях соотношений (5). Именно к такому случаю относятся соотношения (6), для которых

$$R^1 = F - G, \quad R^2 = F + G, \quad F = \frac{2\sqrt{\mu}}{3\xi} \left((1 + \xi H)^{3/2} - 1 \right), \quad G = \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{3\eta} \left((1 + \eta E)^{3/2} - 1 \right). \quad (14)$$

Здесь F , G – вспомогательные обозначения для интегралов

$$F = \int \sqrt{B'(H)} dH, \quad G = \int \sqrt{D'(E)} dE.$$

Обратим внимание на то, что инварианты Римана (13), как известно, определяются с точностью до аддитивных постоянных. При вычислении F , G константы выбраны так, чтобы при предельных переходах $\xi \rightarrow 0$, $\eta \rightarrow 0$ не возникало особенностей. В частности,

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} F = \sqrt{\mu}, \quad \lim_{\eta \rightarrow 0} G = \sqrt{\varepsilon}. \quad (15)$$

Если не интересоваться малыми значениями параметров ξ , η , т.е. считать $\xi \neq 0$, $\eta \neq 0$, то выражения (14) для F , G можно существенно упростить, что приведёт к упрощению и всех последующих формул, но не позволит осуществлять предельные переходы (15).

В случае (14) зависимости E , H от R^1 , R^2 имеют вид

$$H = \frac{1}{\xi} \left(1 + \frac{3\xi(R^1+R^2)}{4\sqrt{\mu}} \right)^{2/3} - \frac{1}{\xi}, \quad E = \frac{1}{\eta} \left(1 + \frac{3\eta(R^2-R^1)}{4\sqrt{\varepsilon}} \right)^{2/3} - \frac{1}{\eta}. \quad (16)$$

В частности,

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} H = \frac{R^1+R^2}{2\sqrt{\mu}}, \quad \lim_{\eta \rightarrow 0} E = \frac{R^2-R^1}{2\sqrt{\varepsilon}}. \quad (17)$$

Неявная форма решения

Неявное решение задачи Коши (10), (11) для инвариантов Римана строим при помощи метода годографа на основе закона сохранения [11, 12, 19]. Для плотности закона сохранения $\varphi(R^1, R^2)$ и плотности потока закона сохранения $\psi(R^1, R^2)$ имеем соотношение

$$\varphi_t(R^1, R^2) + \psi_x(R^1, R^2) = 0. \quad (18)$$

Выполняя в (18) дифференцирование и используя уравнения (10) для исключения производных R_t^1 , R_t^2 , с учётом независимости производных R_x^1 , R_x^2 получим задачу для определения величины $\varphi(R^1, R^2)$ (аналогично для $\psi(R^1, R^2)$):

$$\varphi_{R^1 R^2} + a^0 \varphi_{R^1} + b^0 \varphi_{R^2} = 0, \quad (19)$$

$$\psi_{R^1} = \lambda^1 \varphi_{R^1}, \quad \psi_{R^2} = \lambda^2 \varphi_{R^2}, \quad (20)$$

$$(\psi - \lambda^1 \varphi)|_{R^1=r^1} = 1, \quad (\psi - \lambda^2 \varphi)|_{R^2=r^2} = -1. \quad (21)$$

Здесь r^1, r^2 – некоторые параметры; коэффициенты $a^0(R^1, R^2), b^0(R^1, R^2)$ определяются соотношениями

$$a^0 = \frac{\lambda_{R^2}^1}{\lambda^1 - \lambda^2} = -\frac{\theta_1}{\theta_3 \theta_4}, \quad b^0 = -\frac{\lambda_{R^1}^2}{\lambda^1 - \lambda^2} = \frac{\theta_2}{\theta_3 \theta_4}, \quad \theta_1 = 2\eta\sqrt{\mu} + 2\xi\sqrt{\varepsilon} + 3\eta\xi R^2, \\ \theta_2 = 2\eta\sqrt{\mu} - 2\xi\sqrt{\varepsilon} + 3\eta\xi R^1, \quad \theta_3 = 4\sqrt{\varepsilon} + 3\eta(R^2 - R^1), \\ \theta_4 = 4\sqrt{\mu} + 3\xi(R^1 + R^2), \quad (22)$$

где $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ – обозначения для вспомогательных функций.

Решение задачи (19)–(21), ввиду зависимости φ от параметров r^1, r^2 , принято обозначать как $\varphi(R^1, R^2 | r^1, r^2)$. В [12] показано, что $\varphi(R^1, R^2 | r^1, r^2)$ с точностью до множителя совпадает с функцией Римана – Грина уравнения (19) и имеет вид

$$\varphi(R^1, R^2 | r^1, r^2) = \frac{2\Phi(R^1, R^2 | r^1, r^2)}{\lambda^1(r^1, r^2) - \lambda^2(r^1, r^2)}. \quad (23)$$

Здесь $\Phi(R^1, R^2 | r^1, r^2)$ – функция Римана – Грина уравнения (19), удовлетворяющая по переменным R^1, R^2 уравнению (19), по переменным r^1, r^2 – уравнению, сопряжённому к (19) [24, с. 446–458; 25]. Дополнительный множитель перед функцией Φ определяется условиями (20), (21). При этом, как показано в [12], определять вид функции ψ не требуется.

Неявное двухпараметрическое решение задачи Коши (10), (11) записывается в форме

$$R^1(x, t) = r^1(b), \quad R^2(x, t) = r^2(a), \quad (24)$$

$$r^1(b) = R_0^1(b), \quad r^2(a) = R_0^2(a), \quad (25)$$

$$t = t(a, b), \quad x = x(a, b), \quad (26)$$

$$t(a, b) = \frac{1}{2} \int_a^b \varphi(R_0^1(\tau), R_0^2(\tau) | r^1(b), r^2(a)) d\tau, \quad (27)$$

где a, b – параметры, а формула для $x(a, b)$ аналогична (27) и не записана ввиду громоздкости. Заметим, что при дальнейшем построении решения явный вид функции $x(a, b)$ не требуется.

Параметры a, b допускают различную интерпретацию. Во-первых, a, b можно считать обычными произвольными параметрами. Во-вторых, a, b можно трактовать как лагранжевы переменные – значения инвариантов Римана $R_0^1(b), R_0^2(a)$, т.е. из точек a, b на оси x , не изменяясь, переносятся вдоль характеристик в точку (x, t) . В-третьих, a, b можно рассматривать как функции $a(x, t), b(x, t)$, которые являются обратными к функциям $t(a, b), x(a, b)$ (26). Если удаётся построить явный вид функций $a(x, t), b(x, t)$, то, естественно, неявное решение (24), (25) становится явным. Наконец, в-четвёртых, функции $a(x, t), b(x, t)$, также являются инвариантами Римана, удовлетворяющие уравнениям, аналогичным (10).

Подробное описание метода годографа на основе закона сохранения имеется в [12, с. 21–32], где метод использован при решении задачи Коши для уравнений электрофореза. Первоначально метод предложен в [11] и затем развит и модифицирован в [12, 13, 17, 20].

Заметим, что формула для функции $t(a, b)$, аналогичная (27), получена в [4] при помощи классического метода годографа. Метод на основе закона сохранения более прозрачен, а в [19] показано, что все варианты метода годографа – классический [6, с. 33, 34], обобщённый [23] и метод годографа на основе закона сохранения – эквивалентны.

Функция Римана – Грина для уравнения (19), (22)

Уравнение (19) с коэффициентами (22) путём замены переменных преобразуется к одному из вариантов уравнения Эйлера – Пуассона – Дарбу [25–28]

$$U_{RS} + \gamma \frac{U_R + U_S}{R+S} = 0, \quad \gamma = -\frac{1}{\sigma}, \quad (28)$$

функция Римана – Грина которого хорошо известна, как и решение уравнения (28)

$$U(R, S | r, s) = \frac{(r+s)^\gamma}{(R+S)^\gamma} {}_2F_1(1 - \gamma, \gamma; 1, -z), \quad (29)$$

$$z = \frac{(R-r)(S-s)}{(R+S)(r+s)}, \quad (30)$$

где r, s – параметры; ${}_2F_1$ – гипергеометрическая функция Гаусса.

Для отыскания замены переменных, трансформирующей уравнение (19) в (28), используем результаты [29, с. 116–124]. Вычисляя инварианты Лапласа k, h [29, с. 117], с учётом (22) имеем

$$h = a_{R^1}^0 + a^0 b^0 = -\frac{7\theta_1\theta_2}{\theta_3^2\theta_4^2}, \quad k = b_{R^2}^0 + a^0 b^0 = -\frac{7\theta_1\theta_2}{\theta_3^2\theta_4^2}. \quad (31)$$

Инварианты Лапласа – Овсянникова p, q [29, с. 120] постоянны:

$$p = \frac{k}{h} = 1, \quad q = \frac{(\ln h)_{R^1 R^2}}{h} = \frac{72}{7}. \quad (32)$$

Это, в силу классификационной теоремы [29, с. 123], означает, что уравнение (19) приводится к уравнению Эйлера – Пуассона – Дарбу. Замена переменных [29, с. 123]

$$R = \alpha(R^1), \quad S = \beta(R^2), \quad (33)$$

преобразующая уравнение (28) в (19) (или наоборот), задается согласно [29, с. 123] для определения $\alpha(R^1)$ и $\beta(R^2)$

$$\frac{qh(R^1, R^2)}{2} = \frac{\alpha_{R^1}(R^1)\beta_{R^2}(R^2)}{(\alpha(R^1) + \beta(R^2))^2}. \quad (34)$$

Использование (22), (31), (32) позволяет записать решение уравнения (34) в виде

$$\alpha(R^1) = 8\sqrt{\varepsilon\mu} + 12(\xi\sqrt{\varepsilon} - \eta\sqrt{\mu})R^1 - 9\eta\xi(R^1)^2, \quad (35)$$

$$\beta(R^2) = 8\sqrt{\varepsilon\mu} + 12(\xi\sqrt{\varepsilon} + \eta\sqrt{\mu})R^2 + 9\eta\xi(R^2)^2.$$

Окончательно, осуществляя подстановку (33), (35) в (29), (30), получим функцию Римана – Грина $\Phi(R^1, R^2 | r^1, r^2)$ для уравнения (19)–(22)

$$\Phi(R^1, R^2 | r^1, r^2) = U(\alpha(R^1), \beta(R^2) | \alpha(r^1), \beta(r^2)), \quad (36)$$

которая используется в (23), а затем и в (27) для вычисления функции $t(a, b)$.

Заметим, что для построения функции Римана – Грина можно использовать и результаты [30], близкие к результатам [27, 29].

Построение явного решения задачи Коши

Указать явные выражения для функций $a = a(x, t)$, $b = b(x, t)$ и записать решение непосредственно при помощи (24)–(26) для задачи (10), (11) (или (8), (9)) в явной форме не удаётся. В [12, с. 48–51; 13–17; 19–22] подробно описан способ построения явного решения на линиях уровня неявного решения (в частности, на изохронах $t = \text{const}$) путём интегрирования (в общем случае – численного) некоторой задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Такой алгоритм намного эффективнее, например, численного построения функций $a(x, t)$, $b(x, t)$, обратных к функциям $t(a, b)$, $x(a, b)$. Более того, для конструирования обыкновенных дифференциальных уравнений функция $x(a, b)$ не требуется.

Коротко опишем способ построения явного решения. Рассматриваем некоторую линию уровня функции $t(a, b)$

$$t_* = t(a(\tau), b(\tau)). \quad (37)$$

Здесь считается, что линия уровня (изохрона) является достаточно гладкой и параметризована при помощи некоторого параметра τ ; t_* – фиксированный момент времени, идентифицирующий изохрону.

Дифференцируя (36) по параметру τ , получим задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$a_\tau(\tau) = -t_b(a(\tau), b(\tau)), \quad b_\tau(\tau) = t_a(a(\tau), b(\tau)), \quad X_\tau(\tau) = J(a(\tau), b(\tau)), \quad (38)$$

$$a|_{\tau=0} = a_*, \quad b|_{\tau=0} = b_*, \quad X|_{\tau=0} = X_*,$$

где a_* , b_* – некоторая точка на изохроне (36); $X(\tau) = x(a(\tau), b(\tau))$ – пространственная координата x на изохроне; X_* – координата x на изохроне, соответствующая параметру $\tau = 0$; $J(a, b)$ – якобиан преобразования $(a, b) \rightleftharpoons (x, t)$, который определяется соотношением

$$J(a, b) = (\lambda^2(r^1, r^2) - \lambda^1(r^1, r^2))|_{\substack{r^1=r^1(b) \\ r^2=r^2(a)}} \cdot t_a t_b. \quad (39)$$

Точка (a_*, b_*) легко определяется путём построения изолиний функции $t(a, b)$ на (a, b) -плоскости. Более точный способ определения (a_*, b_*) (а также X_*) при помощи решения

некоторых вспомогательных задач для обыкновенных дифференциальных уравнений подробно описан в [12, с. 48–51].

Однопараметрическое явное решение (24), (25) на изохроне после решения задачи Коши (38), (39) имеет вид

$$R^1(x, t) = R_0^1(b(\tau)), R^2(x, t) = R_0^2(a(\tau)), t = t(a(\tau), b(\tau)), x = X(\tau). \quad (40)$$

Алгоритм позволяет строить решения, многозначные по x , но для рассматриваемой задачи такие решения не имеют физического смысла – в момент «опрокидывания» решения t_z возникает ударная волна. Именно определение t_z и является одним из основных результатов работы [4]. В [21] указывается способ определения момента t_z при помощи решения системы уравнений

$$J(a_z, b_z) = 0, \quad t_{aa}(a_z, b_z)t_{bb}(a_z, b_z) = 0 \quad (41)$$

с последующим вычислением

$$t_z = t(a_z, b_z), \quad (42)$$

где (a_z, b_z) – точка на изохроне t_z , в которой возникает ударная волна.

Результаты расчётов

При выборе параметров расчётов ориентируемся на характерные значения, указанные, например, в [1]. Для поляризации среды (в размерных переменных)

$$P = \varepsilon(\chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3)$$

имеем $\chi^{(1)} \approx 1$, $\chi^{(2)} \approx (10^{-13} - 10^{-11})$ м/В, $\chi^{(3)} \approx (10^{-23} - 10^{-21})$ м²/В² [1, с. 18].

В лазерном пучке можно получить напряжённость E порядка $(10^8 - 10^9)$ В/м [1, с. 16]. Выбирая, например,

$$\chi^{(2)} = 10^{-11} \text{ м/В}, \quad \chi^{(3)} \approx 10^{-23} \text{ м}^2/\text{В}^2, \quad E = 10^9 \text{ В/м} \quad (43)$$

получим

$$\frac{\chi^{(3)}E^3}{\chi^{(2)}E^2} = 10^{-3}, \quad \eta = 2\chi^{(2)}E = 0,02. \quad (44)$$

Кубическими нелинейностями можно пренебрегать по сравнению с квадратичными, и выбор определяющего соотношения в виде (6) при некоторых значениях величины поля и восприимчивости достаточно оправдан.

Далее считаем, что

$$\varepsilon = 1, \quad \mu = 1, \quad \xi = 0, \quad E = O(1), \quad H = O(1). \quad (45)$$

Это соответствует отсутствию нелинейностей, связанных с магнитным полем H , а параметры ε , μ можно без умаления общности считать равными единице, учитывая, в частности, возможность замены (7).

Приведем результаты расчетов для двух вариантов начальных данных и параметров (45).

Вариант I (рис. 1)

Рассмотрим

$$\eta = 0,02, \quad E_0 = \cos x, \quad H_0 = \frac{2}{3\eta}((1 + \eta E_0)^{3/2} - 1), \quad E_0 \approx H_0, \quad \eta \ll 1. \quad (46)$$

Выбор начальных данных в виде (46) обусловлен тем, что, как легко проверить, задача (8), (9) для параметров (45) имеет точное решение при любых значениях параметра η , что, в частности, позволяет проверить эффективность предлагаемого численно-аналитического алгоритма. Не приводя подробности, укажем, что в случае (46) инвариант Римана $R^1 = \text{const}$ и задача сводится лишь к одному квазилинейному уравнению для инварианта R^2 , построение решения для которого не представляет труда [6, с. 72–78; 31, с. 204–214], где приведен простой способ вычисления момента опрокидывания решения в случае одного квазилинейного уравнения.

Результаты расчета приведены на рис. 1, на котором показаны зависимости $E = E(x)$, $H = H(x)$ при $t = 0$ (начальное распределение) и $t = 101,56$ (вычисленный момент опрокидывания).

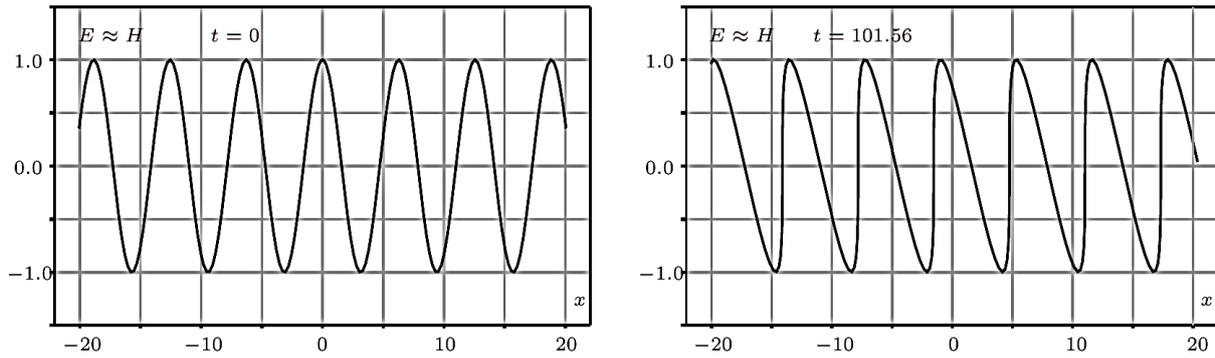


Рис. 1. Зависимости $E = E(x)$, $H = H(x)$ в моменты времени $t = 0$ (начальное распределение), $t = 101,56$ (вычисленный момент опрокидывания). Точное значение момента опрокидывания $t = 99,955$ при $\eta = 0,02$ / Fig. 1. Dependencies $E = E(x)$, $H = H(x)$ at time points $t = 0$ (initial distribution), $t = 101,56$ (calculated rollover moment). The exact value of the tipping moment is $t = 99,955$ at $\eta = 0,02$

Величины E , H в точном решении связаны между собой соотношением (46), т.е. точно так же как начальное распределение E_0 и H_0 . При $\eta = 0,02$ значения напряженностей электрического и магнитного полей практически совпадают ($E \approx H$) и на рис. 1 неразличимы. В момент $t_z = 101,56$ происходит опрокидывание решения (параметры $(a_z, b_z) = (-102,321; 101,468)$ (42)), т.е. возникает ударная электромагнитная волна. Точное значение момента опрокидывания для рассматриваемого случая $t_z = 99,96$. Расхождение между вычисленным и точным значениями t_z составляет 1,6%. Как уже говорилось, использованный метод решения является численно-аналитическим в том смысле, что аппроксимация уравнений и основных соотношений не применяется. Точность метода ограничена лишь точностью численного интегрирования задачи (38), (39) и точностью вычислений интегралов, в частности (27). В рассматриваемом варианте, например, в окрестности $t = t_z$ интервал интегрирования $(b - a) \approx 200$. Именно этим объясняется различие в 1,6% между точным и вычисленным значениями t_z .

Вариант II (рис. 2, 3)

Для того чтобы подчеркнуть важность применения для построения решения именно численно-аналитического метода, не использующего аппроксимацию уравнений, приведены расчеты в случае (рис. 2, 3)

$$\eta = 0,5, \quad E_0 = \cos x, \quad H_0 = 0. \tag{47}$$

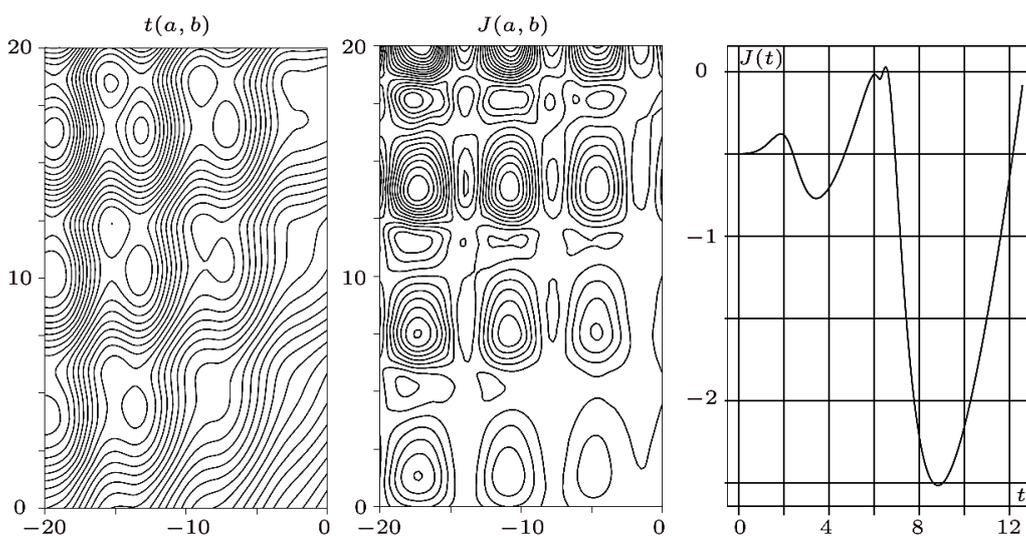


Рис. 2. Изолинии функций $t(a, b)$, $J(a, b)$ и зависимость $J = J(t)$ на луче $a = -1,333b$ / Fig. 2. Isolines of functions $t(a, b)$, $J(a, b)$ and dependence $J = J(t)$ on the ray $a = -1,333b$

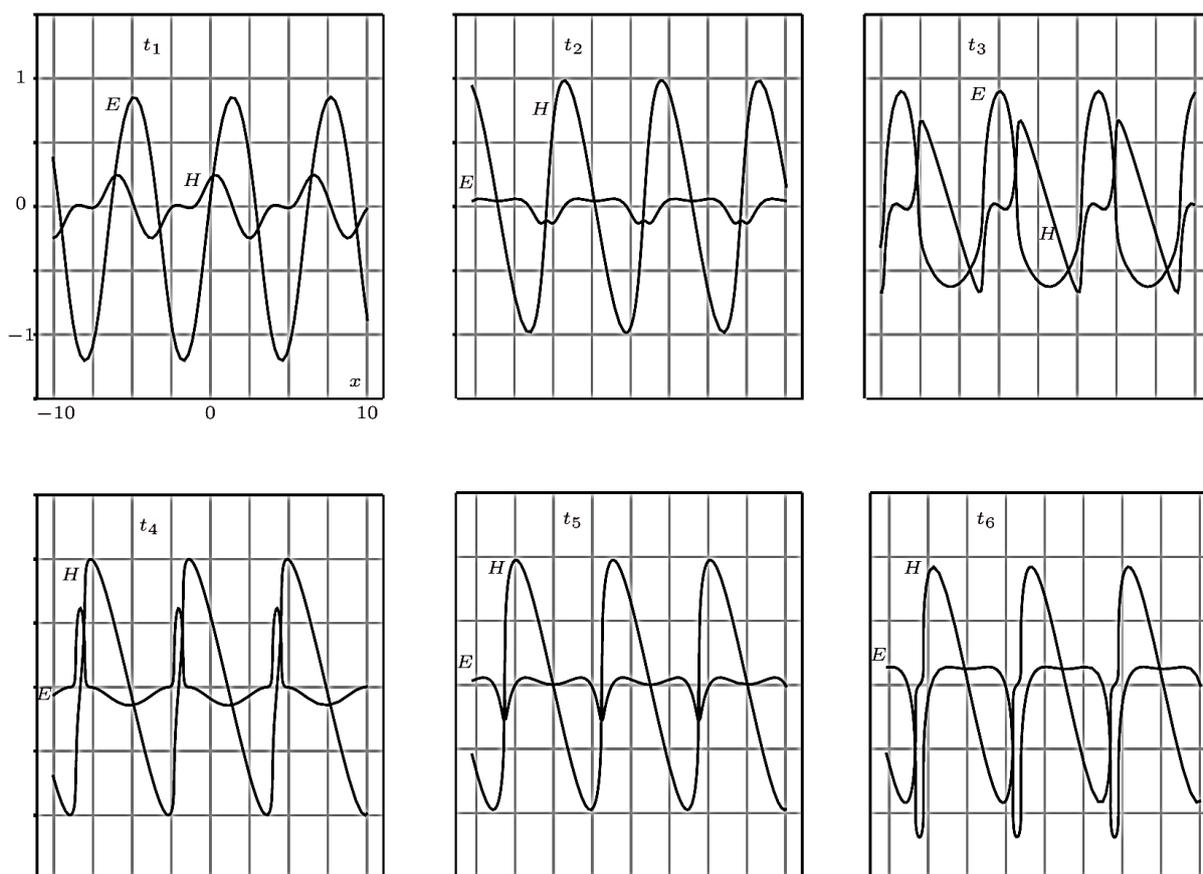


Рис. 3. Зависимости $E = E(x)$, $H = H(x)$ в моменты времени $t_1 = 1,350$, $t_2 = 3,157$, $t_3 = 5,105$, $t_4 = 5,934$, $t_5 = 6,195$, $t_6 = 6,425$, $\eta = 0,5$ / Fig. 3. Dependencies $E = E(x)$, $H = H(x)$ at time $t_1 = 1.350$, $t_2 = 3.157$, $t_3 = 5.105$, $t_4 = 5.934$, $t_5 = 6.195$, $t_6 = 6.425$, $\eta = 0.5$

На рис. 2 демонстрируется весьма сложная структура изолиний функций $t(a, b)$, $J(a, b)$, а также поведение функции $J(t)$. Вычисление функции $J(t)$ на луче $a = a(b)$ (в данном случае – $a = -1,333b$) в плоскости (a, b) позволяет в некоторых случаях определить момент опрокидывания решения $t = t_z$, не решая уравнения (41), или начальное приближение для численного решения системы (41). Не менее сложный вид в данном варианте имеют и функции $E(x, t)$, $H(x, t)$, показанные на рис. 3 в некоторые моменты времени. Видно, что отсутствующее при $t = 0$ магнитное поле ($H_0 = 0$) уже в момент t_1 становится достаточно заметным, а в момент t_2 амплитуда магнитного поля $H(x, t)$ даже существенно превосходит амплитуду электрического поля $E(x, t)$. Момент опрокидывания решения, определенный при помощи уравнений (41), дает значение $t_z = 6,391$ и наступает для значений $(a_z = -8,193, b_z = 6,283)$. Такую же величину t_z , как уже указывалось, можно получить, построив функцию $J(t)$ (рис. 2). Отметим, что в рассматриваемом варианте непосредственно в окрестности $t = t_z$ происходит существенное изменение профиля электрического поля $E(x, t)$, в то время как магнитное поле $H(x, t)$ практически не претерпевает изменения.

Заключение

Предлагаемый в работе метод решения задачи Коши для системы двух квазилинейных гиперболических уравнений, естественно, применим не только для нелинейных уравнений электромагнитного поля (4)–(6), но и для решения задач электрофореза [12, 14, 16, 20], уравнений мелкой воды [12, 13], мелкой воды под твердой крышкой [17, 21], опрокинутой мелкой воды [22] (эллиптические квазилинейные уравнения), слабонелинейных уравнений [19], уравнений двухлучевой редукции солитонного газа [12], серии уравнений, указанных в [11] и т.д.

Классический метод годографа для уравнений в инвариантах Римана – трансформация к линейному уравнению с последующим построением функции Римана – Грина, использовался и ранее для построения неявных решений, по-видимому, начиная с [4, 7–10]. Однако только после работы [11] и ее дальнейшего развития в [12] появилась возможность эффективно решать задачу с начальными данными в явном виде, не используя конечно-разностные методы, методы конечных элементов и конечных объемов.

Результаты, представленные в данной работе, относятся к некоторому частному случаю нелинейных уравнений Максвелла (6). В более сложных случаях определяющих соотношений (6), например, включающих кубические члены E^3 и/или H^3 , не удастся связать явными взаимобратными соотношениями исходные переменные (E, H) и инварианты Римана (R^1, R^1) , что приводит к существенному снижению эффективности метода. Однако на практике влияние нелинейных членов достаточно слабое (в данном случае – $|\eta| \ll 1$) и возможно построение асимптотических решений.

Наконец, укажем, что ТЕМ-волна (поперечная электромагнитная волна, (3)) на практике реализуется либо между двумя плоскими поверхностями, имеющими бесконечную проводимость, либо в коаксиальных линиях передачи (волноводах). В прямоугольных и цилиндрических волноводах ТЕМ-волны не существуют. Наличие точного решения задачи позволяет получать важную информацию об эволюции электромагнитной волны и образовании ударной волны, а также служит эталонным тестом при построении численных алгоритмов более сложных задач.

Список источников

1. Беспрозванных В.Г., Первадчук В.П. Нелинейная оптика: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. 200 с.
2. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
3. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика. М.: Мир, 1976. 261 с.
4. Donato A., Fusco O.D. Some Applications of the Riemann Method to Electromagnetic Wave Propagation in Nonlinear Media // ZAMM. 1980. Vol. 60, № 10. P. 539–542.
5. Rogers C., Cekirge H.M., Askar A. Electromagnetic wave propagation in non-linear dielectric media // Acta Mechanica. 1977. Vol. 26. P. 69–73.
6. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений. М.: Наука, 1978. 668 с.
7. Ludford G.S.S. On an extension of Riemann's method of integration, with applications to one-dimensional gas dynamics // Proc. Cambridge Philos. Soc. 1952. Vol. 48. P. 499–510.
8. Isoard M., Kamchatnov A.M., Pavloff N. Dispersionless evolution of inviscid nonlinear pulses // arXiv:1912.04559v1 [nlin.PS]. 2019. 7 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.04559>
9. Isoard M., Kamchatnov A.M., Pavloff N. Wave breaking and formation of dispersive shock waves in a defocusing nonlinear optical material // Phys. Rev. A. 2019. Vol. 99. P. 053819-1–053819-18. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.053819>
10. Ivanov S.K., Kamchatnov A.M. Collision of rarefaction waves in Bose-Einstein condensates // Phys. Rev. A. 2019. Vol. 99. P. 013609-1–013609-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.013609>
11. Senashov S.I., Yakhno A. Conservation laws, hodograph transformation and boundary value problems of plane plasticity // SIGMA. 2012. Vol. 8, № 071. 16 p. <https://doi.org/10.3842/SIGMA.2012.071>
12. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В., Долгих Т.Ф. Метод годографа для решения гиперболических и эллиптических квазилинейных уравнений. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 126 с.
13. Shiryayeva E.V., Zhukov M.Yu. Hodograph Method and Numerical Integration of Two Hyperbolic Quasilinear Equations. Part I. The Shallow Water Equations // arXiv:1410.2832. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.2832>
14. Shiryayeva E.V., Zhukov M.Yu. Hodograph Method and Numerical Solution of the Two Hyperbolic Quasilinear Equations System. Part II. Zonal Electrophoresis Equations // arXiv:1503.01762. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.01762>
15. Shiryayeva E.V., Zhukov M.Yu. Hodograph Method and Numerical Integration of Two Quasilinear Hyperbolic Equations. Part III. Two-Beam Reduction of the Dense Soliton Gas Equations // arXiv:1512.06710. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.06710>
16. Долгих Т.Ф. Решение задачи о переносе массы под действием электрического поля в двухкомпонентной смеси // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 3-1 (195-1). С. 28–35. EDN: ZOKXHF
17. Долгих Т.Ф. Метод годографа для решения задачи о мелкой воде под твердой крышкой // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 1. С. 15–24. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-1-15-24>

18. Елаева М.С., Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Взаимодействие слабых разрывов и метод годографа для задачи о фракционировании двухкомпонентной смеси электрическим полем // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 2016. Т. 56, № 8. С. 1455–1469. <https://doi.org/10.7868/S0044466916080056>
19. Долгих Т.Ф., Жуков М.Ю. Варианты метода годографа для решения системы двух квазилинейных уравнений // Владикавк. мат. журн. 2021. Т. 23, вып. 2. С. 34–50. <https://doi.org/10.46698/x8869-5899-2064-1>
20. Жуков М.Ю., Долгих Т.Ф. Математические модели жидкости, газа и переноса электрическим полем в многокомпонентных химически активных средах // Математический форум (Итоги науки. Юг России). 2020. Т. 13. С. 87–104. EDN: FVFXHW
21. Долгих Т.Ф., Жуков М.Ю. Метод годографа для решения задачи о мелкой воде под твердой крышкой в случае гиперболических уравнений // Прикл. математика и механика. 2022. Т. 86, № 1. С. 18–34. <https://doi.org/10.31857/S0032823522010039>
22. Долгих Т.Ф., Жуков М.Ю. Метод годографа для решения задачи об опрокинутой мелкой воде // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2022. Т. 62, № 1. С. 113–123. <https://doi.org/10.31857/S0044466922010069>
23. Царев С.П. Геометрия гамильтоновых систем гидродинамического типа. Обобщенный метод годографа // Изв. АН СССР. Сер. мат. 1990. Т. 54, вып. 5. С. 1048–1068. EDN: ZSUOVN.
24. Курант Р. Уравнения с частными производными. М.: Мир, 1964. 830 с.
25. Copson E.T. On the Riemann-Green Function // Arch. Ration. Mech. Anal. 1957. Vol. 1. P. 324–348. <https://doi.org/10.1007/bf00298013>
26. Ибрагимов Н.Х. Групповой анализ обыкновенных дифференциальных уравнений и принцип инвариантности в математической физике // УМН. 1992. Т. 47 (286), вып. 4. С. 83–144.
27. Zeitsch P.J. On the Riemann Function // Mathematics. 2018. Vol. 6, № 12. Art. 316. <https://doi.org/10.3390/math6120316>
28. Капцов О.В. Методы интегрирования уравнений с частными производными. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 184 с.
29. Овсянников Л.В. Групповой анализ дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1978. 339 с.
30. Daggitt E.A. The Use of Infinitesimal Transformations in Predicting the Form of the Riemann (-Green) Function // J. of Mathematical Analysis and Applications. 1970. Vol. 29. P. 91–108. [https://doi.org/10.1016/0022-247x\(70\)90103-4](https://doi.org/10.1016/0022-247x(70)90103-4)
31. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Микрогидродинамика, жидкие пленки и электрофорез. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2014. 240 с.

References

1. Besprozvannykh V.G., Pervadchuk V.P. *Nonlinear optics: study guide*. Perm: Publishing House of Perm State Technical University; 2011. 200 p. (In Russ.).
2. Agrawal G. *Nonlinear fiber optics*. Moscow: World; 1996. 323 p. (In Russ.).
3. Zernike F., Midwinter J. *Applied nonlinear optics*. Moscow: World; 1976. 261 p. (In Russ.).
4. Donato A., Fusco O.D. Some Applications of the Riemann Method to Electromagnetic Wave Propagation in Nonlinear Media. *ZAMM*. 1980;60(10):539-542.
5. Rogers C., Cekirge H.M., Askar A. Electromagnetic wave propagation in non-linear dielectric media. *Acta Mechanica*. 1977;26:69-73.
6. Rozhdestvensky B. L., Yanenko N. N. *Systems of quasi-linear equations*. Moscow: Science; 1978. 668 p. (In Russ.).
7. Ludford G.S.S. On an extension of Riemann's method of integration with applications to one-dimensional gas dynamics. *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1952;48:499-510.
8. Isoard M., Kamchatnov A.M., Pavloff N. Dispersionless evolution of inviscid nonlinear pulses. *arXiv:1912.04559* [nlin.PS]. 2019. 7 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.04559>
9. Isoard M., Kamchatnov A.M., Pavloff N. Wave breaking and formation of dispersive shock waves in a defocusing nonlinear optical material. *Phys. Rev. A*. 2019;99:053819-1-053819-18. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.053819>
10. Ivanov S.K., Kamchatnov A.M. Collision of rarefaction waves in Bose-Einstein condensates. *Phys. Rev. A*. 2019;99:013609-1-013609-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.013609>
11. Senashov S.I., Yakhno A. Conservation laws, hodograph transformation and boundary value problems of plane plasticity. *SIGMA*. 2012;8(071):16. <https://doi.org/10.3842/SIGMA.2012.071>
12. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V., Dolgikh T. F. *The hodograph method for solving hyperbolic and elliptic quasi-linear equations*. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University; 2015. 126 p. (In Russ.).
13. Shiryayeva E.V., Zhukov M.Yu. Hodograph Method and Numerical Integration of Two Hyperbolic Quasilinear Equations. Part I. The Shallow Water Equations. *arXiv:1410.2832*. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.2832>

14. Shiryayeva E.V., Zhukov M.Yu. Hodograph Method and Numerical Solution of the Two Hyperbolic Quasilinear Equations System. Part II. Zonal Electrophoresis Equations. *arXiv:1503.01762*. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.01762>
15. Shiryayeva E.V., Zhukov M.Yu. Hodograph Method and Numerical Integration of Two Quasilinear Hyperbolic Equations. Part III. Two-Beam Reduction of the Dense Soliton Gas Equations. *arXiv:1512.06710*. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.06710>
16. Dolgikh T.F. Solving the problem of mass transfer under the action of an electric field in a two-component mixture. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(3-1):28-35. (In Russ.). EDN: ZOKXHF
17. Dolgikh T.F. The hodograph method for solving the problem of shallow water under a hard lid. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(1):15-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-1-15-24>
18. Yelaeva M.S., Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. Interaction of weak discontinuities and the hodograph method for the problem of fractionation of a two-component mixture by an electric field. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2016;56(8):1455-1469. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0044466916080056>
19. Dolgikh T.F., Zhukov M.Yu. Variants of the hodograph method for solving a system of two quasi-linear equations. *Vladikavkaz Mathematical Journal*. 2021;23(2):34-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.46698/x8869-5899-2064-1>
20. Zhukov M.Yu., Dolgikh T.F. Mathematical models of liquid, gas and electric field transport in multicomponent chemically active media. *Mathematical Forum (Results of Science. South of Russia)*. 2020;13:87-104. (In Russ.). EDN: FVFXHW.
21. Dolgikh T.F., Zhukov M.Yu. The hodograph method for solving the problem of shallow water under a solid lid in the case of hyperbolic equations. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2022;86(1):18-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032823522010039>
22. Dolgikh T.F., Zhukov M.Yu. The hodograph method for solving the problem of overturned shallow water. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2022;62(1):113-123. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044466922010069>
23. Tsarev S. P. The geometry of Hamiltonian systems of hydrodynamic type. The generalized hodograph method. *Mathematics of the USSR-Izvestiya*. 1991;37(2):397-419. <https://doi.org/10.1070/IM1991v037n02ABEH002069>
24. Courant R. *Partial differential equations*. Moscow: World; 1964. 830 p. (In Russ.).
25. Copson E.T. On the Riemann-Green Function. *Arch. Ration. Mech. Anal*. 1957;1:324-348. <https://doi.org/10.1007/bf00298013>
26. Ibragimov N.H. Group analysis of ordinary differential equations and the principle of invariance in mathematical physics. *Russian Mathematical Surveys*. 1992;47(4):89-156. <https://doi.org/10.1070/RM1992v047n04ABEH000916>
27. Zeitsch P.J. On the Riemann Function. *Mathematics*. 2018;6(12):316. <https://doi.org/10.3390/math6120316>
28. Kaptsov O.V. *Methods of integration of partial differential equations*. Moscow: Physical and Mathematical Literature; 2009. 184 p. (In Russ.).
29. Ovsiyannikov L.V. *Group analysis of differential equations*. Moscow: Science; 1978. 339 p. (In Russ.).
30. Daggit E.A. The Use of Infinitesimal Transformations in Predicting the Form of the Riemann (-Green) Function. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 1970;29:91-108. [https://doi.org/10.1016/0022-247x\(70\)90103-4](https://doi.org/10.1016/0022-247x(70)90103-4)
31. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. *Microhydrodynamics, liquid films and electrophoresis*. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University; 2014. 240 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В.А. Гетман – старший преподаватель, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Т.Ф. Долгих – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

V.A. Getman – Senior Lecturer, Department of the Numerical Methods and Mathematic Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

T.F. Dolgikh – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Numerical Methods and Mathematic Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 07.09.2024; одобрена после рецензирования 24.09.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 07.09.2024; approved after reviewing 24.09.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 534.2

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-40-50>

ЭФФЕКТЫ ФОКУСИРОВКИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ВОЛН ОТ ВНУТРЕННЕЙ ГРАНИЦЫ ЭЛЛИПСА

**Межлум Альбертович Сумбатян^{1✉}, Николай Васильевич Боев²,
Владислав Сергеевич Харитонов³**

^{1, 2, 3} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

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

² nvboev@sfedu.ru

³ vharitonov@sfedu.ru

Аннотация. Математическое исследование явления фокусировки волн при отражении от 2D-криволинейных отражателей проведено в рамках геометрической теории дифракции на основе физической теории дифракции Кирхгофа. Получен явный вид главного члена разложения давления в отраженной акустической волне. На примере вогнутого эллиптического отражателя установлено, что в случае определенного взаимного расположения источника и приемника волн появляются сингулярные эффекты фокусировки, которые приводят к тому, что амплитуда отраженной волны может иметь различный порядок роста с ростом частоты. В каждом из установленных случаев получен в явном виде главный член асимптотического разложения давления в отраженной волне. Асимптотические результаты сопоставлены с результатами прямых численных расчетов дифракционных интегралов.

Ключевые слова: дифракция, криволинейный отражатель, геометрическая теория дифракции, фокусировка, метод стационарной фазы

Для цитирования: Сумбатян М.А., Боев Н.В., Харитонов В.С. Эффекты фокусировки при отражении волн от внутренней границы эллипса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-40-50>

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

Original article

FOCUSING EFFECTS IN REFLECTION OF WAVES FROM THE INNER BOUNDARY OF AN ELLIPSE

Mezhlum A. Sumbatyan^{1✉}, Nikolay V. Boyev², Vladislav S. Kharitonov³

^{1, 2, 3} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

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

² nvboev@sfedu.ru

³ vharitonov@sfedu.ru

Abstract. Mathematical study of the phenomenon of wave focusing during reflection from 2D-curvilinear reflectors is carried out within the framework of the geometric theory of diffraction based on the Kirchhoff physical theory of diffraction. An explicit form of the leading term of the pressure expansion in the reflected acoustic wave is obtained. In the work, using the example of a concave elliptical reflector, it is established that in the case of a certain mutual arrangement of the source and the receiver, singular focusing effects appear, which lead to the fact that the amplitude of the reflected wave can have a different order of growth with increasing frequency. In each

© Сумбатян М.А., Боев Н.В., Харитонов В.С., 2025

of the established cases, the leading terms of the asymptotic expansions of the pressure in the reflected wave are obtained in explicit form. The obtained asymptotic results are compared with the results of direct numerical calculations of the diffraction integrals.

Keywords: diffraction, curved reflector, geometric theory of diffraction, focusing, stationary phase method

For citation: Sumbatyan M.A., Boyev N.V., Kharitonov V.S. Focusing Effects in Reflection of Waves From the Inner Boundary of an Ellipse. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2025(1):40-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-40-50>

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

Введение

Математические основы в исследовании распространения световых и звуковых волн заложены И. Ньютоном, обосновавшим единство лучевой и волновой природы этих явлений (хороший исторический обзор приведен, например, в [1]). При дальнейшем развитии этих идей оказалось, что основные формулы геометрической теории дифракции получаются из волнового представления дифракционного интеграла Кирхгофа – Гюйгенса, как его асимптотическая оценка при волновом числе $k \rightarrow \infty$ методом стационарной фазы [2–5]. Авторам работ [6–9] в рамках этого подхода удалось построить решение задачи дифракции не только при однократном, но и многократном отражении, причем как в двумерных, так и в трехмерных задачах.

В этих публикациях при исследовании однократного, двукратного и многократного рассеяния коротких волн на препятствиях гладкой формы содержатся обоснованные указания на возможность существования эффектов фокусировки звуковых полей в сплошных средах. Математически фокусировка появляется, когда в точке отражения стационарная точка фазовой функции в дифракционном интеграле Кирхгофа – Гюйгенса становится вырожденной [3]. Для преодоления сложностей, связанных с нерегулярностью фазы, необходимо учитывать слагаемые более высокого порядка малости в ее разложении в окрестности точки зеркального отражения. Некоторые общие фундаментальные идеи в этом направлении обозначены в [3]. В настоящей работе эти идеи получают дальнейшее развитие; в явном виде построены некоторые коротковолновые асимптотические представления для акустического давления в сфокусированных волновых полях.

С физической точки зрения главным побудительным моментом для проведения исследования, представленного ниже, является стремление прояснить ситуацию, возникшую в результате полемики вокруг вопроса, может ли явление фокусировки акустических волн при отражении от вогнутых препятствий быть корректно описано геометрическими методами. Некоторые авторы [10, 11] подразумевают, что эффект фокусировки может быть получен лишь волновыми методами, что опровергается результатами, представленными в данной статье. Похожая полемика возникла на стадии рецензирования при прохождении в печать статьи [9].

Здесь обсуждаемая проблема рассматривается на простой двумерной задаче однократного рассеяния акустических волн на вогнутой части эллиптического отражателя, где в соответствии с общей методологией лучевых геометрических методов получены явные высокочастотные представления для различных вариантов фокусировки. Дается сравнение с прямым численным расчетом волнового дифракционного интеграла. В регулярном (без фокусировки) и в вырожденном (с фокусировкой) случаях численное решение осциллирует вокруг асимптотического, стремясь к нему при $k \rightarrow \infty$.

Математическая формулировка задачи

Пусть из точки x_0 двумерной (2D) акустической среды на акустически твердое препятствие, ограниченное гладкой кривой ℓ , падает сферическая (в 2D-случае – круговая) монохроматическая волна (рис. 1). Зависимость от времени определяется множителем $e^{-i\omega t}$, где ω – частота колебаний; $k = \omega/c$ – волновое число; c – скорость звука в среде. Рассматривается высокочастотный режим колебаний, поэтому параметры ω и k – большие.

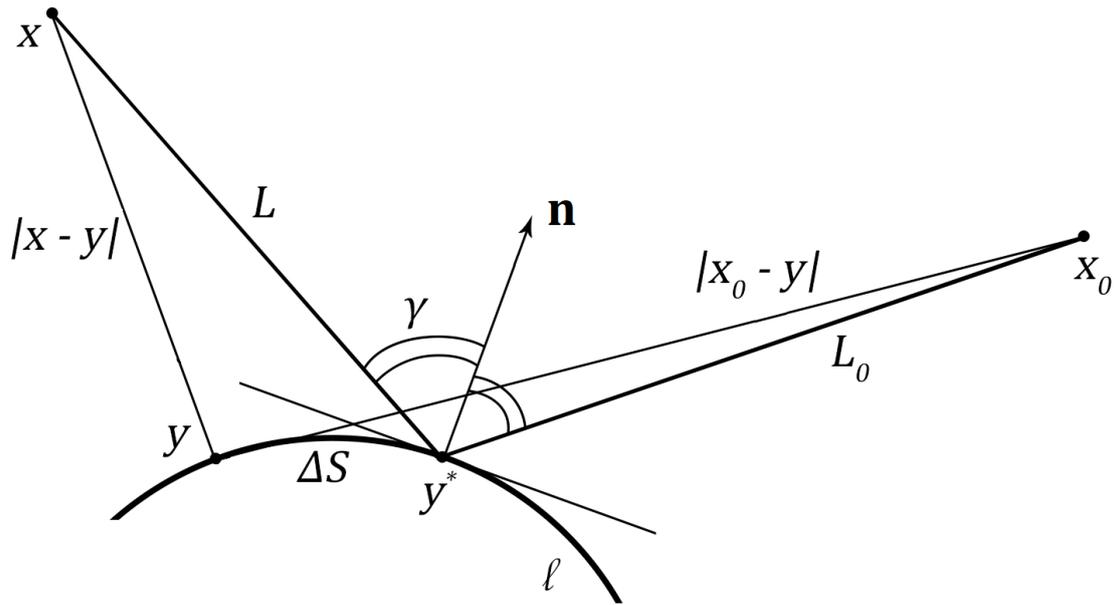


Рис. 1. Распространение волны, вышедшей из точечного источника x_0 , отразившейся от границы препятствия ℓ в точке y^* и пришедшей в точку x / Fig. 1. Propagation of a wave, emitted from the point source x_0 , reflected from the boundary ℓ at point y^* , and received at point x

Асимптотически амплитуда давления, порожденного волной от точечного источника в точке $x = (x_1^0, x_2^0)$, в произвольной точке $y = (y_1, y_2)$ среды задается соотношением

$$p^{inc}(y) = \frac{e^{ik|y-x_0|}}{|y-x_0|^{\frac{1}{2}}}. \quad (1)$$

Высококастотное решение, построенное ниже при $k \rightarrow \infty$, дает главный асимптотический член амплитуды луча, вышедшего из точки x_0 , отразившегося от границы препятствия в точке $y^* = (y_1^*, y_2^*)$ и пришедшего в точку $x = (x_1, x_2)$.

Согласно теории дифракции Кирхгофа, давление $p(x)$ в отраженной волне в точке x среды определяется интегралом [12]

$$p(x) = \int_{\ell} 2p^{inc}(y) \frac{\partial \Phi(y,x)}{\partial n_y} d\ell_y, \quad (2)$$

если граница абсолютно твердая ($(\partial p / \partial n)_{\ell} = 0$). Здесь $\Phi(y, x) = (i/4)H_0^{(1)}(k|y - x|)$ – функция Грина для двумерного уравнения Гельмгольца; n_y – внешняя нормаль к контуру ℓ в точке y ; $H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля 1-го рода нулевого порядка.

Заметим, что долгое время в среде физиков-акустиков существовало представление о теории дифракции Кирхгофа как о приближенной инженерной теории. Однако в 80-х гг. XX в. было доказано, что в зоне света решение по теории Кирхгофа дает главный член асимптотики при $k \rightarrow \infty$. Более детально этот вопрос обсуждается в [12].

Преобразуем дифракционный интеграл (2) при $k \rightarrow \infty$. С этой целью рассмотрим нормальную производную функции Грина $\partial \Phi(y, x) / \partial n_y$ в подынтегральном выражении (2). Обозначим $\mathbf{r} = y - x$, $r = |y - x|$. С учетом асимптотики функции Ханкеля для большого аргумента [13] получим $H_0^{(1)}(z) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi z}} e^{i(z - \pi/4)} \left[1 + O\left(\frac{1}{z}\right) \right]$, ($z \rightarrow \infty$).

Асимптотическое представление при $k \rightarrow \infty$ для нормальной производной от функции Грина в формуле (2) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(y,x)}{\partial n_y} &= \frac{i}{4} \frac{\partial}{\partial n_y} \left[H_0^{(1)}(kr) \right] \sim \frac{i}{4} \sqrt{\frac{2}{\pi k}} e^{-\pi i/4} \frac{\partial}{\partial n_y} \left(\frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}} \right) \left[1 + O\left(\frac{1}{kr}\right) \right] \sim \\ &\sim \frac{i}{2} \sqrt{\frac{1}{2\pi k}} e^{-\pi i/4} ik \frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}} \frac{\partial r}{\partial n_y} \left[1 + O\left(\frac{1}{kr}\right) \right], \quad \frac{\partial r}{\partial n_y} = (\nabla r, \mathbf{n}_y) = \cos(\mathbf{r} \wedge \mathbf{n}_y). \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя (1) и (3) в (2), получаем представление для акустического давления в отраженной волне:

$$p(x) = e^{-\pi i/4} \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \int_{\ell} \frac{\cos(\mathbf{r}^n y)}{\sqrt{r r_0}} e^{ik\varphi(y)} d\ell_y, \quad (4)$$

где фазовая функция $\varphi(y) = r + r_0$, $r_0 = |y - x_0|$, $r = |y - x|$.

В высокочастотном режиме колебаний давление в отраженной волне определяется направлением падения волны и малой окрестностью ℓ^* точки зеркального отражения $y^* \in \ell^*$. Введем обозначения: $L_0 = |y^* - x_0|$ – расстояние от источника до точки зеркального отражения; $L = |y^* - x|$ – расстояние от точки зеркального отражения до приемника. Функция $\cos(\mathbf{r}^n y)/\sqrt{r r_0}$ является слабоизменяющейся в малой окрестности ℓ^* и может быть заменена на ее значение в точке зеркального отражения $\cos \gamma/\sqrt{L_0 L}$. Вынося эту постоянную за знак интеграла в (4), получаем

$$p(x) = e^{-\pi i/4} \sqrt{\frac{k \cos \gamma}{2\pi \sqrt{L_0 L}}} \int_{\ell} e^{ik\varphi(y)} d\ell_y, \quad \varphi(y) = |y - x_0| + |y - x|, \quad (5)$$

где γ – угол падения волны, равный углу отражения. При $k \rightarrow \infty$ подынтегральная функция $e^{ik\varphi(y)}$ является быстроосциллирующей, и главный член асимптотики определяется вкладом стационарной точки, если таковая существует [3].

Все предыдущие формулы справедливы для произвольной гладкой граничной кривой ℓ . В дальнейшем ограничимся рассмотрением простейшей геометрии в виде вогнутой дуги эллиптической формы. При этом нам понадобится разложение фазовой функции $\varphi(y)$ в окрестности точки зеркального отражения y^* с точностью до величин пятого порядка малости включительно.

Рассмотрим текущую точку y на эллипсе в малой окрестности точки зеркального отражения y^* . Длина дуги y^*y (рис. 2) по аналогии с рис. 1 обозначена как $\Delta s = \tau$. Тогда расстояния $|y - x_0|$ и $|y - x|$ могут быть представлены в виде разложений по малой длине дуги τ , вплоть до малых пятого порядка включительно. Уравнение эллипса с полуосями a и b ($b < a$) (рис. 2) в выбранной системе координат имеет вид $\frac{y_1^2}{a^2} + \frac{(y_2 - b)^2}{b^2} = 1$, $\sim y_2 = b - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - y_1^2}$.

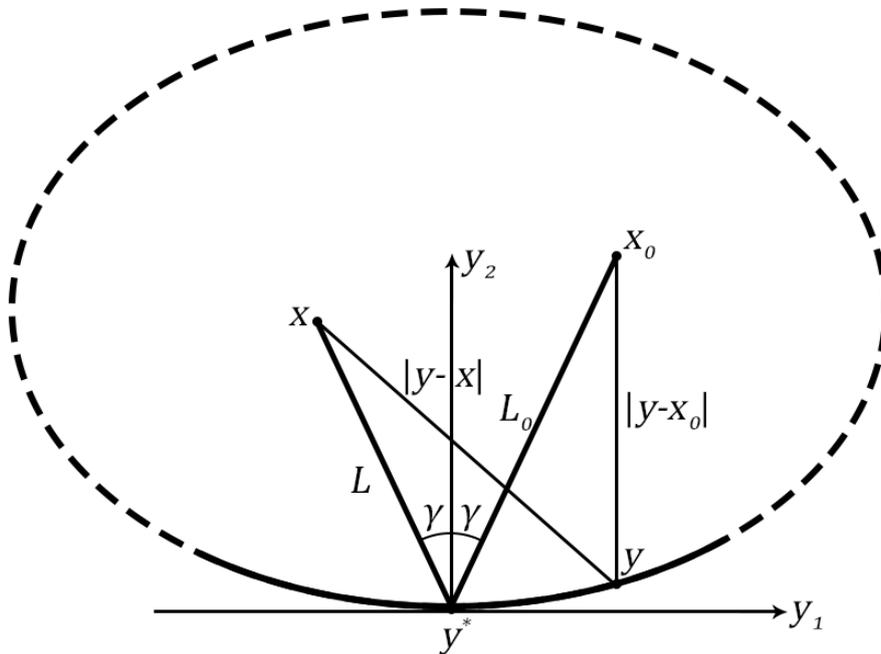


Рис. 2. Отражение волны в нижней точке y^* вогнутой части эллипса
 / Fig. 2. Wave reflection at the bottom point y^* of the concave part of an ellipse

Тогда $|y - x_0| = r_0(\tau) = B_0 + B_1\tau + B_2\tau^2 + B_3\tau^3 + B_4\tau^4 + B_5\tau^5$, где
 $B_0 = r_0(0) = L_0$, $B_1 = r_0'(0) = -\sin \gamma$, $B_2 = \frac{r_0''(0)}{2} = \frac{\cos^2 \gamma}{2} \left(\frac{1}{L_0} - \frac{b}{a^2 \cos \gamma} \right)$,

$$\begin{aligned}
 B_3 &= \frac{r_0'''(0)}{6} = \frac{\sin \gamma}{6} \left[C_1 + \frac{3}{L_0} \cos^2 \gamma \left(\frac{1}{L_0} - \frac{b}{a^2 \cos \gamma} \right) \right], \\
 B_4 &= \frac{r_0^{IV}(0)}{24} = \frac{1}{24} \left[\cos \gamma \frac{b}{a^4} (1 - 4d^2) + \frac{b^2}{a^4 L_0} (3 - 7 \cos^2 \gamma) + \right. \\
 &+ 6 \frac{b \cos \gamma}{a^2 L_0^2} (3 \cos^2 \gamma - 2) + 3 \frac{\cos^2 \gamma}{L_0^3} (4 - 5 \cos^2 \gamma) \left. \right], \\
 B_5 &= \frac{r_0^V(0)}{120} = \frac{\sin \gamma}{120} \left[C_2 - 10C_1^2 + \frac{15}{L_0} \left(\frac{b \cos \gamma}{a^4} \left(2 \frac{b^2}{a^2} - 1 \right) + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. \frac{b^2}{a^4 L_0} (1 - 5 \cos^2 \gamma) + 2 \frac{b \cos \gamma}{a^2 L_0^2} (5 \cos^2 \gamma - 2) + \frac{\cos^2 \gamma}{L_0^3} (4 - 7 \cos^2 \gamma) \right) \right]. \\
 C_1 &= \frac{1-d^2}{a^2} = \frac{b^2}{a^4}, \quad C_2 = \frac{3(1-d^2)(3+d^2)}{a^4}, \quad d = \frac{c}{a}, \quad c^2 = a^2 - b^2.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Аналогично можно получить разложение для $|y - x| = r(\tau)$, если в формулах (6) вместо L_0 подставить L и для нечетных коэффициентов B_1, B_3, B_5 взять выражения с противоположными знаками, сохранив при этом знаки четных коэффициентов.

В результате для полной фазы $\varphi = r_0 + r$ в (5) получим

$$\varphi(\tau) = L_0 + L + A_2 \tau^2 + A_3 \tau^3 + A_4 \tau^4 + A_5 \tau^5, \tag{7}$$

где

$$A_2 = \frac{\cos^2 \gamma}{2} \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L} - \frac{2b}{a^2 \cos \gamma} \right), \tag{8}$$

$$A_3 = \frac{\sin \gamma \cos^2 \gamma}{2} \left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L} \right) \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L} - \frac{b}{a^2 \cos \gamma} \right), \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 A_4 &= \frac{\sin \gamma}{8} \left[2b \frac{1-4d^2}{3a^4} \cos \gamma + \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L} \right) \frac{b^2}{a^4} \left(1 - \frac{7}{3} \cos^2 \gamma \right) + \right. \\
 &+ \left. \left(\frac{1}{L_0^2} + \frac{1}{L^2} \right) 2b \frac{\cos \gamma}{a^2} (3 \cos^2 \gamma - 2) + \left(\frac{1}{L_0^3} + \frac{1}{L^3} \right) \cos^2 \gamma (4 - 5 \cos^2 \gamma) \right], \tag{10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_5 &= \frac{\sin \gamma}{8} \left[\left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L} \right) \frac{b \cos \gamma}{a^4} \left(2 \frac{b^2}{a^2} - 1 \right) + \left(\frac{1}{L_0^2} - \frac{1}{L^2} \right) \frac{b^2}{a^4} (1 - 5 \cos^2 \gamma) + \right. \\
 &+ \left. 2 \left(\frac{1}{L_0^3} - \frac{1}{L^3} \right) \frac{b \cos \gamma}{a^2} (5 \cos^2 \gamma - 2) + \left(\frac{1}{L_0^4} - \frac{1}{L^4} \right) \cos^2 \gamma (4 - 7 \cos^2 \gamma) \right]. \tag{11}
 \end{aligned}$$

Заметим, что в фазовой функции $\varphi(y)$ отсутствует слагаемое, содержащее первую степень приращения дуги τ : $\varphi'_\tau(0) = 0$. Это говорит о том, что точка зеркального отражения $y = y^*$ (при $\tau = 0$) является стационарной точкой фазовой функции.

Возможные случаи фокусировки

1. $A_2 \neq 0$. Начнем со случая регулярной стационарной точки. В этом случае фокусировки нет, и отражение происходит обычным образом. При этом асимптотически при $k \rightarrow \infty$ амплитуда отраженной волны выходит на постоянное значение.

В самом деле, согласно общей идее метода стационарной фазы [3], главный член асимптотики интеграла (5) определяется вкладом малой окрестности стационарной точки с первыми ненулевыми членами в разложении фазовой функции (7). Более того, асимптотически вклад малой окрестности при интегрировании осциллирующей функции эквивалентен интегралу по бесконечной прямой [3]:

$$\begin{aligned}
 \int_{\ell} e^{ik\varphi(y)} d\ell_y &\sim \int_{\ell} e^{ik(L_0+L+A_2\tau^2)} d\tau \sim e^{ik(L_0+L)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikA_2\tau^2} d\tau = \\
 &= e^{ik(L_0+L)} 2 \int_0^{\infty} e^{ikA_2\tau^2} d\tau = \left(\tau^2 = t, \quad d\tau = \frac{dt}{2\sqrt{t}} \right) = \\
 &= e^{ik(L_0+L)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikA_2t} \frac{dt}{2\sqrt{t}} = e^{ik(L_0+L)} \sqrt{\frac{\pi}{-ikA_2}} = \left(A_2 = |A_2| e^{\frac{\pi i(1-\delta)}{2}}, \quad \delta = \text{sign}(A_2) \right) = \\
 &= e^{ik(L_0+L)} \sqrt{\frac{\pi}{k|A_2|}} \left[e^{-\pi i/2 + \pi i(1-\delta)/2} \right]^{(-1/2)} = \\
 &= e^{ik(L_0+L)} \sqrt{\frac{\pi}{k|A_2|}} \left[e^{-\pi i\delta/2} \right]^{(-1/2)} = e^{ik(L_0+L)} \sqrt{\frac{\pi}{k|A_2|}} e^{\pi i\delta/4},
 \end{aligned} \tag{12}$$

где при взятии интеграла по полубесконечному интервалу использован табличный интеграл [14].

Подставляя (12) в (5), окончательно получаем при $k \rightarrow \infty$

$$p(x) = e^{-\pi i/4} \sqrt{\frac{k \cos \gamma}{2\pi \sqrt{L_0 L}}} \times e^{ik(L_0+L)} \sqrt{\frac{\pi}{k|A_2|}} e^{\pi i \delta/4} = \sqrt{\frac{1}{2L_0 L |A_2|}} \cos \gamma e^{ik[L_0+L+\pi(\delta-1)/4]},$$

$$|p(x)| = \frac{\cos \gamma}{\sqrt{2L_0 L |A_2|}}. \quad (13)$$

Формула (13) показывает, что амплитуда давления $|p(x)|$ при возрастании волнового числа выходит на постоянное значение, как и исходное давление в падающей волне (1). Обычно это свойство имеет место в классическом регулярном случае без фокусировки [6, 12]. Пример расчета для геометрии, изображенной на рис. 2, приведен на рис. 3.

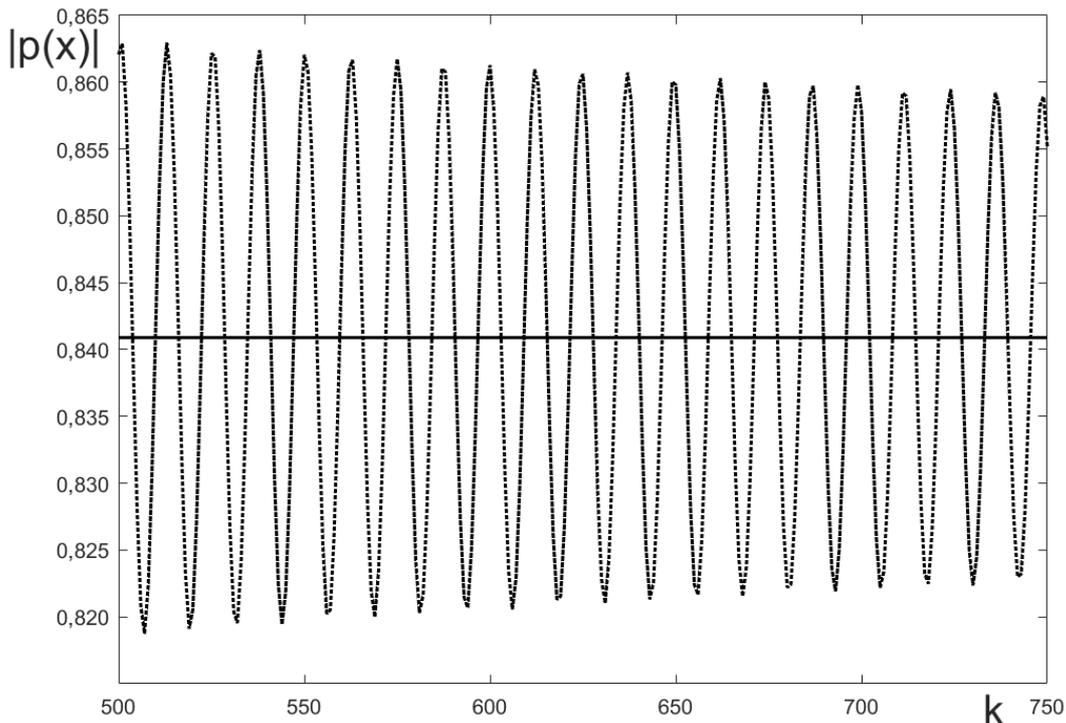


Рис. 3. Отражение без фокусировки. Сравнение асимптотического (сплошная линия) и численного (осциллирующая линия) расчетов для геометрии рис. 2 при $a = 2$; $b = 1$; $\gamma = \pi/4$; $A_2 \neq 0$; $L_0 = L = b/\cos \gamma = \sqrt{2}b$ / Fig. 3. Reflection without focusing. Comparison of the asymptotic (solid line) and numerical (oscillating line) solutions for geometry of Fig. 2 with $a = 2$; $b = 1$; $\gamma = \pi/4$; $A_2 \neq 0$; $L_0 = L = b/\cos \gamma = \sqrt{2}b$

В этом примере источник x_0 и приемник x лежат на горизонтальной оси эллипса симметрично относительно его вертикальной оси. При этом $\gamma = \pi/4$. Из рис. 3 видно, что с ростом волнового числа k амплитуда отраженной волны действительно стремится к своему предельному значению (13), не зависящему от k , поскольку отклонение численного расчета дифракционного интеграла (5), дающего осциллирующую кривую, от асимптотического решения уменьшается с ростом k . Численный расчет выполнен с переходом к параметрическому виду уравнения эллипса в его естественных осях вместо осей на рис. 2, введенных для оценки зависимости фазовой функции интеграла (5) от малой длины дуги $\Delta s = \tau$. Таким образом, для численных расчетов уравнение эллипса берется в виде $y_1 = a \cos(t), y_2 = b \cos(t), (0 < t < \pi)$, $dl = \sqrt{a^2 \sin^2(t) + b^2 \cos^2(t)} dt$, причем вертикальная ось y_2 направлена из центра эллипса вниз. При этом для исключения точек многократного переотражения интервал интегрирования сужается до более узкого, содержащего точку зеркального отражения y^* при $t = \pi/2$. Для реальных расчетов выбран интервал $\pi/4 < t < 3\pi/4$ длиной $\pi/2$.

2. $A_2 = 0, A_3 \neq 0$. Обращение коэффициента A_2 в нуль означает, что знаменатель в выражении (12) также обращается в нуль. Это является первым признаком нерегулярности отражения,

связанной с наличием фокусировки. При этом следующий член в разложении (7) может быть либо отличным от нуля, либо также обращаться в нуль. Здесь рассмотрим первый из этих двух случаев. Назовем его фокусировкой 1-го порядка.

В этом случае, согласно общей идее метода стационарной фазы [3], главный вклад в интеграл (5) определяет коэффициент A_3 (табличное значение интеграла взято из [14]):

$$\begin{aligned} \int_{\rho} e^{ik\varphi(y)} d\ell_y &\sim \int_{\rho} e^{ik(L_0+L+A_3\tau^3)} d\tau \sim e^{ik(L_0+L)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikA_3\tau^3} d\tau = \\ &= e^{ik(L_0+L)} \left(\int_0^{\infty} e^{ikA_3\tau^3} d\tau + \int_0^{\infty} e^{-ikA_3\tau^3} d\tau \right) = e^{ik(L_0+L)} 2 \int_0^{\infty} \cos(kA_3\tau^3) d\tau = \\ &= \left(\tau^3 = t, d\tau = \frac{dt}{3t^{2/3}} \right) = e^{ik(L_0+L)} \frac{2}{3} \int_0^{\infty} \cos(kA_3t) \frac{dt}{t^{2/3}} = \frac{e^{ik(L_0+L)}}{\sqrt{3}} \frac{\Gamma(1/3)}{(k|A_3|)^{1/3}}, \end{aligned}$$

где Γ – гамма-функция Эйлера.

На рис. 4 показан пример геометрии, при которой имеет место данная фокусировка 1-го порядка. Главный член асимптотики давления при $k \rightarrow \infty$ в этом примере определяется по формуле (5) в виде

$$p(x) \sim e^{-\pi i/4} \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \frac{\cos \gamma}{\sqrt{L_0 L}} \cdot \frac{e^{ik(L_0+L)}}{\sqrt{3}} \frac{\Gamma(1/3)}{(k|A_3|)^{1/3}} = e^{ik(L_0+L) - \frac{\pi i}{4}} \frac{k^{1/6} \cos \gamma \Gamma(1/3)}{\sqrt{6\pi L_0 L} |A_3|^{1/3}}, \quad (14)$$

$$|p(x)| = \frac{k^{1/6} \cos \gamma \Gamma(1/3)}{\sqrt{6\pi L_0 L} |A_3|^{1/3}}, \quad \Gamma\left(\frac{1}{3}\right) = 2,67894.$$

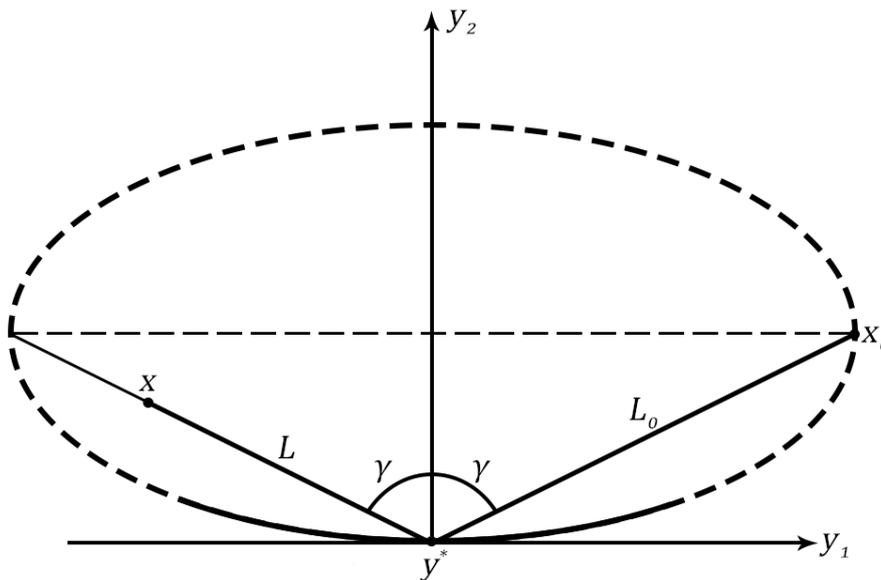


Рис. 4. Отражение с фокусировкой 1-го порядка: $A_2 = 0, A_3 \neq 0, a = 2, b = 1, \gamma = \text{atan}(2), \cos(\gamma) = 1/\sqrt{5}, L_0 = b/\cos \gamma = \sqrt{5}, L = 2L_0/3$ / Fig. 4. Reflection with a focusing of the first order: $A_2 = 0, A_3 \neq 0, a = 2, b = 1, \gamma = \text{atan}(2), \cos(\gamma) = 1/\sqrt{5}, L_0 = b/\cos \gamma = \sqrt{5}, L = 2L_0/3$

Здесь давление растет с ростом частоты (т.е. с ростом параметра k), что довольно неожиданно. Степень роста равна $O(k^{1/6})$. Сравнение асимптотики (14) с прямым численным расчетом интеграла в (5) приведено на рис. 5 на интервале изменения волнового числа от 1000 до 4000.

Здесь также видно, что амплитуда отклонения осцилляций от монотонно возрастающего асимптотического решения (14) убывает с ростом частоты, т.е. численное решение действительно стремится к асимптотическому.

3. $A_2 = 0, A_3 = 0, A_4 \neq 0$. Назовем этот случай фокусировкой 2-го порядка.

Из (8), (9) следует, что $A_3 = \sin \gamma \left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L} \right) \left(A_2 + \frac{b}{2a^2} \cos \gamma \right)$.

Если $A_2 = 0$, то A_3 может обращаться в нуль лишь при $L_0 = L$, т.е. если отражение – абсолютно симметричное. При этом равенство $A_2 = 0$ означает, что $\cos \gamma = bL/a^2$. Подставляя эти соотношения в (10), получаем

$$A_4 = \frac{b^2}{4a^4L} \left(1 - \frac{L^2}{a^2}\right), \quad (15)$$

что при $L \neq a$ дает ненулевое значение коэффициента A_4 .

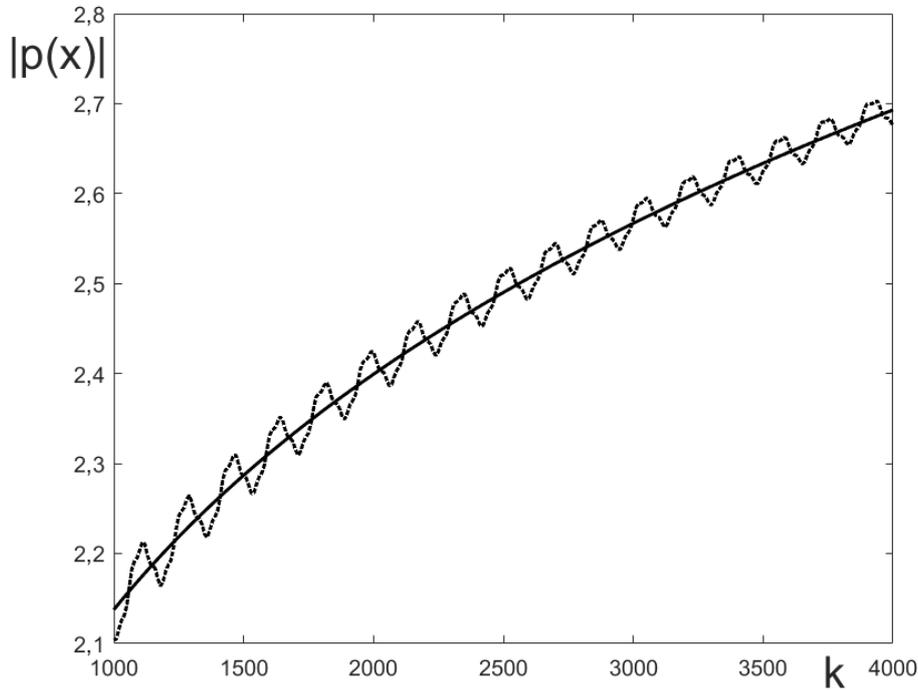


Рис. 5. Сравнение асимптотического (монотонная сплошная линия) и численного (осциллирующая пунктирная линия) расчета для геометрии рис. 4 / Fig. 5. Comparison of asymptotic (monotonic solid line) and numerical (oscillating dotted line) calculations for the geometry of Fig. 4

В этом случае, согласно общей идее метода стационарной фазы [3], главный вклад в интеграл (5) определяет коэффициент A_4 (табличное значение интеграла взято из [14]):

$$\begin{aligned} \int_{\rho} e^{ik\varphi(y)} d\ell_y &\sim \int_{\rho} e^{ik(L_0+L+A_4\tau^4)} d\tau \sim e^{ik(L_0+L)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikA_4\tau^4} d\tau = \\ &= e^{ik(L_0+L)} 2 \int_0^{\infty} e^{ikA_4\tau^4} d\tau = \left(\tau^4 = t, d\tau = \frac{dt}{4t^{3/4}}\right) = \frac{e^{ik(L_0+L)}}{2} \int_0^{\infty} e^{ikA_4t} \frac{dt}{t^{3/4}} = (ikA_4 = -p) = \\ &= \frac{e^{ik(L_0+L)}}{2} \int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{dt}{t^{3/4}} = \frac{\Gamma(1/4)e^{ik(L_0+L)}}{2(k|A_4|)^{1/4}} [e^{-\pi i/2+\pi i(1-\delta)/2}]^{(-1/4)} = \frac{\Gamma(1/4)e^{ik(L_0+L)}}{2(k|A_4|)^{1/4}} e^{\pi i\delta/8}. \end{aligned}$$

Таким образом, главный член асимптотики давления в этом примере определяется по формуле (5) в виде

$$\begin{aligned} p(x) &\sim e^{-\pi i/4} \sqrt{\frac{k \cos \gamma}{2\pi \sqrt{L_0L}}} \times \frac{\Gamma(1/4)e^{ik(L_0+L)}}{2(k|A_4|)^{1/4}} e^{\pi i\delta/8} = \\ &= e^{ik(L_0+L)+\frac{(\delta-2)\pi i}{8}} \frac{\cos \gamma}{\sqrt{L_0L}} \frac{\Gamma(1/4)k^{1/4}}{2\sqrt{2\pi}|A_4|^{1/4}}, |p(x)| \sim \frac{\cos \gamma}{\sqrt{L_0L}} \frac{\Gamma(1/4)k^{1/4}}{2\sqrt{2\pi}|A_4|^{1/4}}, (k \rightarrow \infty), \Gamma\left(\frac{1}{4}\right) = 3,62561 \end{aligned} \quad (16)$$

На рис. 6 для рассматриваемой фокусировки 2-го порядка показан пример сравнения численного расчета дифракционного интеграла с явным асимптотическим представлением $L = L_0 = a/2$. В этом случае $\cos \gamma = bL/a^2 = b/(2a)$. Очевидно, здесь давление растет при увеличении частоты быстрее, чем в случае фокусировки 1-го порядка. Степень роста здесь равна $O(k^{1/4})$.

На рис. 6 также видно, что амплитуда отклонения осцилляций от монотонно возрастающего асимптотического решения (16) убывает с ростом частоты.

Любопытно, что в этом примере амплитуда осцилляций при численном расчете убывает с ростом волнового числа заметно быстрее, чем в предыдущих. Тем не менее пунктирная линия и

здесь приближается к асимптотической. Например, если в нижней области частот (левая часть рис. 6) среднее отклонение асимптотической кривой от численной – примерно 0,3, то на более высоких частотах (правая часть рисунка) – примерно 0,13. Это подтверждает, что расхождение между двумя кривыми стремится к нулю при $k \rightarrow \infty$.

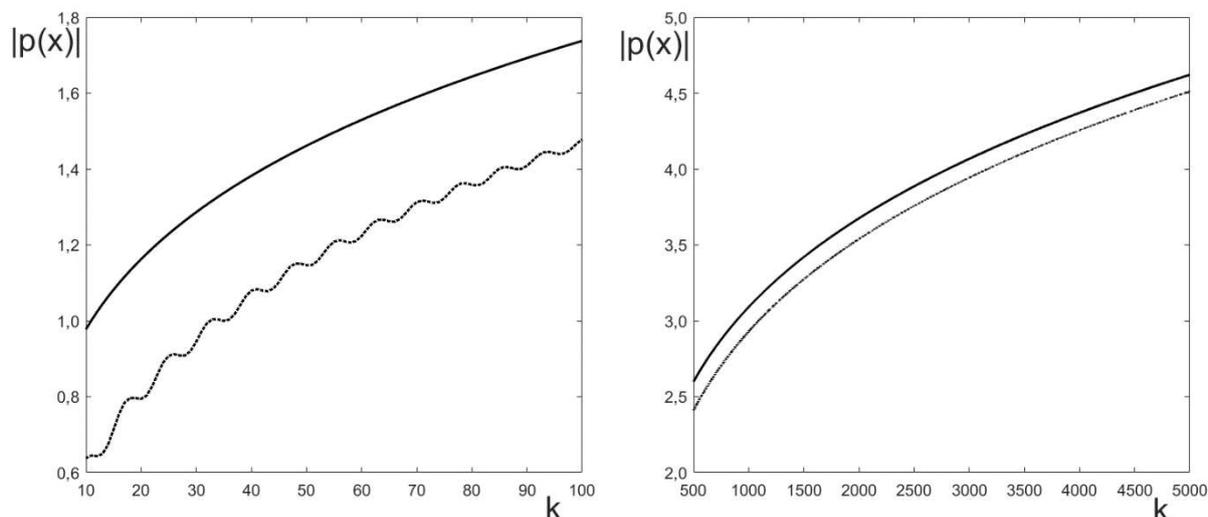


Рис. 6. Сравнение асимптотического (монотонная сплошная линия) и численного (осциллирующая пунктирная линия) решений для фокусировки 2-го порядка на двух частотных интервалах: $A_2 = 0$; $A_3 = 0$; $A_4 \neq 0$, $a = 2$; $b = 1$; $L = L_0 = a/2$, $\cos(\gamma) = bL/a^2 = 1/4$ / Fig. 6. Comparison of the asymptotic (monotonic solid line) and numerical (oscillating dashed line) solutions, with a focusing of the 2nd order, on two frequency intervals: $A_2 = 0$; $A_3 = 0$; $A_4 \neq 0$; $a = 2$; $b = 1$; $L = L_0 = a/2$, $\cos(\gamma) = bL/a^2 = 1/4$

4. Фокусировки более высокого порядка. Как было показано выше, нулевые значения $A_2 = 0$; $A_3 = 0$ автоматически означают, что $L = L_0$. При этом, как следует из (11), $A_5 = 0$, т.е. фокусировка 3-го порядка, для которой $A_2 = 0, A_3 = 0, A_4 = 0, A_5 \neq 0$, в эллипсе невозможна. Вопрос о существовании фокусировок более высокого порядка требует дополнительного исследования.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе показано, что геометрические (лучевые) методы в теории дифракции имеют широкое применение и обладают высокой точностью в области коротких волн. Полученные результаты опровергают предположение, что эффекты фокусировки при дифракции на вогнутых препятствиях могут быть адекватно описаны лишь волновыми методами. Подтверждена универсальность геометрических методов, которые с успехом могут быть применены в теории дифракции не только в классических регулярных случаях, но и для отражений с фокусировкой.

2. При проведении данного исследования обнаружены эффекты фокусировки звуковых волн различного порядка. Они отличаются друг от друга структурой разложения фазовой функции в интеграле Кирхгофа – Гюйгенса в окрестности стационарной точки, которая физически соответствует точке отражения волны. В фокусировке любого порядка выполняется закон зеркального отражения, согласно которому угол падения равен углу отражения. Однако амплитуда отраженной волны существенно зависит от порядка фокусировки.

3. В качестве примеров рассмотрены фокусировки 1-го и 2-го порядка на внутренней части эллиптической дуги (двумерная задача). В отличие от регулярного случая (без фокусировки), где амплитуда давления с ростом волнового числа стремится к постоянному значению, при фокусировке во всех случаях амплитуда акустического давления неограниченно возрастает. Представлены явные высокочастотные выражения, которые показывают, что степень роста акустического

давления при $k \rightarrow \infty$ становится более существенной при возрастании порядка фокусировки. Для фокусировки 1-го порядка степень роста равна $O(k^{1/6})$, 2-го порядка – $O(k^{1/4})$.

4. В данной работе доказывается, что при отражении внутри эллипса фокусировка 3-го порядка невозможна. Остается открытым вопрос о наличии фокусировок более высокого порядка, чем третий, что требует дополнительного исследования.

5. Методы, развитые в данной работе для исследования фокусировки в двумерном случае дифракции внутри эллиптического отражателя, могут быть применены и в трехмерных задачах о фокусировке при отражении от поверхностей канонической формы и более сложной геометрии.

Список источников

1. Pierce A.P. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. New York: ASA Publ., 1991. 678 p.
2. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. М.: Судостроение, 1972. 349 с.
3. Федорюк М.В. Метод перевала. М.: Наука, 1977. 368 с.
4. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 248 с.
5. Keller J.B. Geometrical theory of diffraction // *J. of the Optical Society of America*. 1962. Vol. 52, № 2. P. 116–130. <https://doi.org/10.1364/josa.52.000116>
6. Sumbatyan M.A., Boyev N.V. High-frequency diffraction by nonconvex obstacles // *J. of the Acoustical Society of America*. 1994. Vol. 95, № 5. P. 2346–2353. <https://doi.org/10.1121/1.409871>
7. Боев Н.В., Сумбатян М.А. Коротковолновая дифракция на телах, ограниченных произвольной гладкой поверхностью // Докл. РАН. 2003. Т. 392, № 5. С. 614–617. EDN: OPLXCT.
8. Боев Н.В. Рассеяние высокочастотных волн на поверхностях в сплошных средах с учетом переотражений // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50, № 6. С. 756–617. EDN: OPRFUD.
9. Boyev N.V., Sumbatyan M.A., Brigante M. Explicit short-wave representations and Ray Tracing method for reflections from curved surfaces in room acoustics // *J. of Sound and Vibration*. 2022. Vol. 523. Art. 116723. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116723>
10. Vercammen M. Sound reflections from concave spherical surfaces. Part I: Wave field approximation // *Acta Acustica United with Acustica*. 2010. Vol. 96. P. 82–91.
11. Vercammen M. Sound reflections from concave spherical surfaces. Part II: Geometrical acoustics and engineering approach // *Acta Acustica United with Acustica*. 2010. Vol. 96. P. 92–101.
12. Сумбатян М.А., Скалия А. Основы теории дифракции с приложениями в механике и акустике. М.: Физматлит, 2013. 328 с.
13. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 830 с.
14. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды: элементарные функции. М.: Наука, 1981. 800 с.

References

1. Pierce A.P. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. New York: ASA Publ.; 1991. 678 p.
2. Shenderov E.L. *Wave problems of hydroacoustics*. Moscow: Shipbuilding; 1972. 349 p. (In Russ.).
3. Fedoryuk M.V. *Steepest descent method*. Moscow: Science; 1977. 368 p. (In Russ.).
4. Borovikov V.A., Kinber B.E. *Geometrical diffraction theory*. Moscow: Connection; 1978. 248 p. (In Russ.).
5. Keller J.B. Geometrical Theory of Diffraction. *J. of the Optical Society of America*. 1962;52(2):116-130. <https://doi.org/10.1364/josa.52.000116>
6. Sumbatyan M.A., Boyev N.V. High-frequency diffraction by nonconvex obstacles. *J. of the Acoustical Society of America*. 1994;95(5):2346-2353. <https://doi.org/10.1121/1.409871>
7. Boyev N.V., Sumbatyan M.A. Short-wave diffraction on bodies with an arbitrary smooth surface. *Doklady Physics*. 2003;48(10):540-544. <https://doi.org/10.1134/1.1623532>
8. Boev N.V. Scattering of the high-frequency waves by surfaces in continuous media with allowance for rereflections. *Acoustical Physics*. 2004;50(6):651-656. <https://doi.org/10.1134/1.1825094>
9. Boyev N.V., Sumbatyan M.A., Brigante M. Explicit short-wave representations and Ray Tracing method for reflections from curved surfaces in room acoustics. *J. of Sound and Vibration*. 2022;523:116723. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116723>
10. Vercammen M. Sound reflections from concave spherical surfaces. Part I: Wave field approximation. *Acta Acustica United with Acustica*. 2010;96:82-91.

11. Vercammen M. Sound reflections from concave spherical surfaces. Part II: Geometrical acoustics and engineering approach. *Acta Acustica United with Acustica*. 2010;96:92-101.
12. Sumbatyan M.A., Scalia A. *Foundations of diffraction theory with applications in mechanics and acoustics*. Moscow: Physical and Mathematical Literature; 2013. 328 p. (In Russ.).
13. Abramowitz M., Stegun I. *Handbook on mathematical functions*. Moscow: Science; 1979. 830 p. (In Russ.).
14. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marychev O.I. *Integrals and series: elementary functions*. Moscow: Science; 1981. 800 p. (In Russ.).

Информация об авторах

М.А. Сумбатян – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.
Н.В. Боев – доктор физико-математических наук, профессор кафедры дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.
В.С. Харитонов – магистр кафедры дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича

Information about the authors

Mezhlum A. Sumbatyan – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.
Nikolay V. Boyev – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.
Vladislav S. Kharitonov – Master, Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 07.09.2024; одобрена после рецензирования 24.09.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 07.09.2024; approved after reviewing 24.09.2024; accepted for publication 17.02.2025.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 502/504

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-51-57>

КОНЦЕНТРАЦИИ МИКРОПЛАСТИКА В НЕКОТОРЫХ РЕКАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ ЮГА РОССИИ

Марина Артуровна Анциферова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

m12antsiferova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6549-8606>

Аннотация. Исследование направлено на оценку концентраций микропластика в реках и водохранилищах юга европейской части России. Изучены такие водные объекты, как Нижний Дон, Нижняя Волга, Северский Донец, Цимлянское, Карповское, Береславское и Варваровское водохранилища. Работа велась различными методиками, поэтому данные по концентрациям частиц в разные годы разнятся в зависимости от метода отбора, но прослеживаются основные закономерности пространственного распределения, связанные с высоким накоплением частиц в антропогенно трансформированных территориях, притоках, бьефах гидроузлов. В 2023 г. выявлены следующие концентрации: в Дону – 94,32 шт/м³, в Волге – 81,06, в Цимлянском водохранилище – 12,3 шт/м³. В 2021 г. содержание составило в Нижнем Дону – 36 шт/л, в Цимлянском водохранилище – 33, в Северском Донце – 38 шт/л. В 2022 г. обнаружено частиц: в Нижнем Дону – 21 шт/л, в Цимлянском водохранилище – 10, в Нижней Волге – 16, в водохранилищах Волго-Донского судоходного канала – от 11 до 19 шт/л. Большая часть обнаруженных образцов являются прозрачными мелкими волокнами, в составе которых полиэтилен, полиэтилентерефталат, полистирол, полиамид.

Ключевые слова: микропластик, пластиковый мусор, полимеры, Нижний Дон, Нижняя Волга, Цимлянское водохранилище, Северский Донец, полиэтилен

Для цитирования: Анциферова М.А. Концентрации микропластика в некоторых реках и водохранилищах Юга России // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 51–57. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-51-57>

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 122011900153-9.

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

Original article

MICROPLASTIC CONCENTRATIONS IN SOME RIVERS AND RESERVOIRS IN SOUTHERN RUSSIA

Marina A. Antsiferova

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

m12antsiferova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6549-8606>

Abstract. *The study is aimed at assessing the concentrations of microplastics in rivers and reservoirs of the south of the European part of Russia. The following water bodies were studied: the Lower Don, Lower Volga, Seversky Donets, Tsimlyansk, Karpovka, Bereslavka and Varvara reservoirs. The work was carried out using various methods, so the data on particle concentrations in different years vary depending on the sampling method, but the main patterns of spatial distribution associated with a high accumulation of particles in anthropogenically transformed areas, tributaries, and pools of hydraulic structures are traced. In 2023, the following concentrations were found: In the Don - 94.32 pcs/m³, in the Volga - 81.06, in the Tsimlyansk reservoir - 12.3 pcs/m³. In 2021, the content in the Lower Don was 36 pcs/l, Tsimlyansk reservoir - 33, Seversky Donets - 38 pcs/l. In 2022, 21 pcs/l of particles were found in the Lower Don, 10 pcs/l in the Tsimlyansk Reservoir, and 16 pcs/l in the Lower Volga. In the reservoirs of the Volga-Don Shipping Canal - from 11 to 19 pcs/l. Most of the detected particles are transparent small fibers, whose composition is determined as polyethylene and polyethylene terephthalate.*

Keywords: *microplastics, plastic waste, polymers, Lower Don, Lower Volga, Tsimlyansk Reservoir, Seversky Donets, polyethylene*

For citation: Antsiferova M.A. Microplastic Concentrations in Some Rivers and Reservoirs in Southern Russia. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):51-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-51-57>

Acknowledgments: *the publication was prepared within the framework of the implementation of the state task force of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, No. gr. project 122011900153-9*

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

Введение

Стойкость к внешним воздействиям и дешевизна материала привели к высокому рыночному спросу на синтетические полимеры. В 2021–2022 гг. выпуск пластмасс в мире составил 390 млн т, а с 1950 по 2020 г. было произведено около 6,3 млрд т пластика. В России производство пластмасс в 2023 г., по данным Росстата, составило 10,7 млн т, что больше на 3,7 %, чем в 2022 г., – наиболее активно растёт производство полимеров этилена, пропилена и винилхлорида. Объём пластиковых бытовых отходов в среднем достигает 3 млн т/г, из них вовлекается во вторичный оборот всего 5–7 %, а остальное попадает на полигоны [1].

Пластик, подвергаясь воздействию окружающей среды, фрагментируется до более мелких объектов – микропластика (МП). Термин охватывает широкий перечень синтетических полимеров, объединённых общим параметром – размером, который составляет от 0,1–0,3 до 5 мм. Частицы, образованные в результате разрушения более крупного пластикового мусора, классифицируют как вторичный МП, также выделяют и первичный [2], т.е. произведённый изначально в мелких фракциях, но его встречаемость в окружающей среде значительно ниже.

Таким образом, окружающая среда активно подвержена загрязнению пластмассами, в частности значительный урон приходится на долю водных ресурсов. По результатам исследований, проведенных в различных морских экосистемах во всем мире, оказывается, что наиболее часто обнаруживаемыми МП являются полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), полистирол (ПС) и полиэтилентерефталат (ПЭТ) [3].

Цель исследования – определение концентраций МП в реках и водохранилищах юга европейской части России, а именно в Нижнем Дону, Нижней Волге, Цимлянском водохранилище и водохранилищах Волго-Донского судоходного канала (ВДСК).

Обзор проблемы и актуальность

Исследования МП делятся уже около 20 лет – первая статья была опубликована в 2004 г. [4], и большая часть работ сконцентрирована на загрязнении полимерами морской среды и Мирового океана, а их нахождение в пресноводных системах оставалось малозатронутым, хотя реки выступают значительным источником поступления мусора и сами испытывают высокую нагрузку пластикового загрязнения. Модели переноса МП [5], как и натурные исследования речных осадков [6], показали, что пластик частично задерживается в речных системах из-за осаждения, агрегирования с органическим и минеральным веществом, а также биообрастания.

Источники пресной воды всегда подвергались высокой антропогенной нагрузке, являясь при этом самым необходимым ресурсом, – поэтому критически важно восполнять пробелы в представлении об их загрязнении. Несмотря на то что исследования начинают смещать фокус внимания на воды суши, данные о концентрациях МП в них всё ещё являются фрагментарными [5]. Актуальным является и изучение закономерностей распространения, источников и путей переноса микрочастиц полимеров различными типами водных объектов.

Отдельно стоит методический вопрос – сложно дать точную оценку концентраций МП, возможно её завышение или занижение в связи с разными техниками отбора проб. Если в случае обработки наиболее признанной и используемой стала методика НОАА [7], и данный этап уже не вызывает активных дискуссий, то для сбора материала применяются разные способы.

В целом все виды отбора проб воды на загрязнение МП делятся на концентрированные и полнообъёмные.

Концентрированный способ заключается в фильтрации больших объёмов воды через сети с различным номиналом ячеи [8], сито или каскад сит [9], порой усовершенствованных до более сложных проботорборных комплексов [10]. Плюсы этих методов заключаются в сборе большого количества материала, что даёт возможность провести точный анализ, однако есть вероятность получить ошибочные концентрации в силу того, что мелкие частицы могут не попадать в сети, в то время как при палубных работах существует высокая вероятность стороннего загрязнения пробы. Применение сетей с различным номиналом ячеек вызывает затруднения при сравнении с другими натурными исследованиями. Например, при сравнении данных по отбору сетями с ячейками 80 и 450 мкм содержание МП в первом случае значительно выше [11], т.е. чем больше размер ячеи, тем вероятнее недооценка количества загрязнителя, но при использовании сетей с малым размером быстро теряется их фильтрационная способность. Форма каждой частицы также определяет, пройдет ли она через сетку или задержится на ней, например, волокна из-за малого диаметра плохо удерживаются в сетках [12].

Полнообъёмным методом пробы отбираются батометрами, пластиковыми и металлическими вёдрами [13], затем фильтруются, их объем варьирует от 1 до 100 л. Такие образцы меньше подвержены попаданию стороннего загрязнения, однако их зачастую малый объем не даёт возможности получить репрезентативные данные, провести полный анализ, дать точную характеристику и оценку. Полнообъёмная методика редко применяется из-за низкой концентрации пластиковых частиц в воде [14], наиболее часто используется метод концентрирования проб.

Район работ

Область исследований включает несколько наиболее крупных пресноводных объектов на юге европейской части России, а именно Нижний Дон, Северский Донец, Цимлянское водохранилище и Нижнюю Волгу. Также были затронуты водохранилища ВДСК (Карповское, Береславское, Варваровское) и Волго-Каспийский судоходный канал. Работы производились в летний и летне-осенний меженный период.

Экспедиционные работы, проводимые в июне 2021 г. на НИС «Профессор Панов», охватывали Цимлянское водохранилище, Нижний Дон и Северский Донец. Исследование 2022 г. на ПТР «Денеб», кроме Нижнего Дона и Цимлянского водохранилища, включало также Нижнюю Волгу и каскад водохранилищ ВДСК, но был исключен Северский Донец (рис. 1). Маршрут 2023 г. повторял предыдущий.

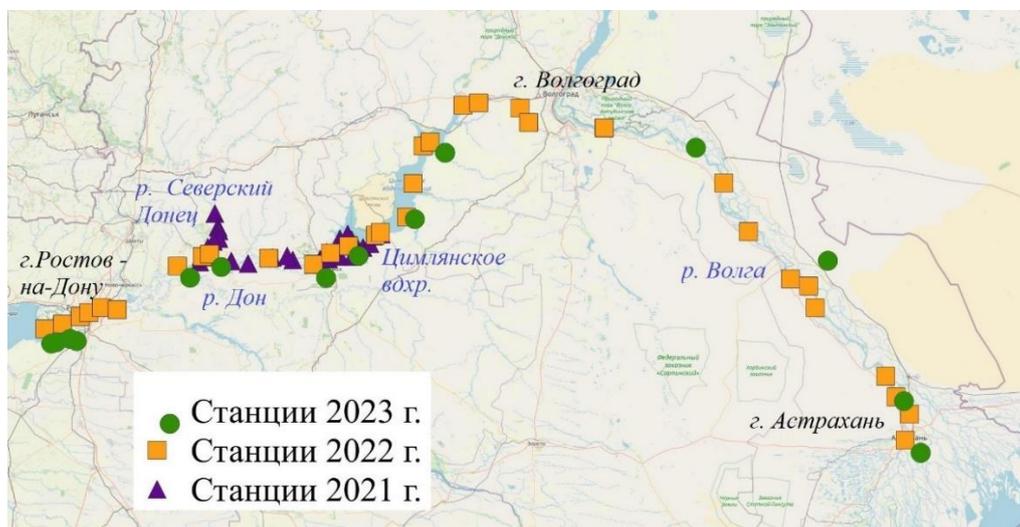


Рис. 1. Карта-схема станций всех съёмок / Fig. 1. Map-scheme of stations of all surveys

Материалы и методы

Материал был собран во время экспедиционных работ в 2021–2023 гг. как полнообъёмным способом (батометр) в первые два года, так и концентрированным в 2023 г. (траление нейстонной сети). Далее пробы обрабатывались одинаково модифицированным методом НОАА [7] и изучались под оптическим микроскопом для выявления количества частиц, морфологических и морфометрических особенностей. Состав определялся спектроскопией комбинационного рассеяния и ИК-Фурье-спектроскопией – среди образцов, собранных в 2021–2022 г., удалось идентифицировать 30 %, в 2023 г. – 70 %.

Зная состав, а соответственно, и плотность МП, а также его концентрации, рассчитали общий его вынос всеми исследуемыми водными объектами.

Результаты

МП обнаружен повсеместно в значительных концентрациях.

Северский Донец в 2021 г. оказался наиболее загрязненным объектом со средним содержанием частиц 38 шт/л, а наибольшее значение (43 шт/л) установлено в месте впадения р. Кундрючьей и, предположительно, связано с её стоком. В Нижнем Дону концентрация составила 36 шт/л с повышением показателя до 48 шт/л (Константиновский гидроузел). Приблизительно такой же уровень загрязнения зафиксирован и в Цимлянском водохранилище – 33 шт/л с максимумами, расположенными ближе к береговой линии водоёма (рис. 1). В целом наблюдается достаточно равномерное распределение МП по исследуемым объектам.

В 2022 г. концентрации частиц в Нижнем Дону колебались от 10 до 41 шт/л (х. Старозолотовский) со средними значениями 21 шт/л, в Цимлянском вдхр. – от 5 до 18 шт/л (верхний бьеф) со средним 10 шт/л. В Нижней Волге содержание МП – 16 шт/л, варьируя в пределах от 8 до 30 шт/л (в районе г. Волгограда). Концентрации частиц в ВДСК определялись в каждом отдельном водохранилище, в Карповском вдхр. – 11 шт/л, в Береславском вдхр. – 14, в Варваровском вдхр. – 19 шт/л.

По данным 2023 г., средние концентрации МП в Дону составили $94,32 \text{ шт/м}^3$ ($0,0047 \text{ г/м}^3$), самые высокие показатели зафиксированы около ст. Романовской – $131,91 \text{ шт/м}^3$ ($0,0174 \text{ г/м}^3$), что,

на наш взгляд, связано со сбросом вод Цимлянского водохранилища. В самом же водохранилище зафиксировано низкое содержание частиц – $12,3 \text{ шт/м}^3$ ($0,0016 \text{ г/м}^3$). В Нижней Волге в среднем обнаружено $81,06 \text{ шт/м}^3$ ($0,0028 \text{ г/м}^3$) и отмечено три точки с высокими значениями: 100 шт/м^3 на участке реки, относящейся к Республике Калмыкии (место водозабора), в Астрахани – 98, Волгограде – 92 шт/м^3 . Концентрация частиц в Волго-Каспийском судоходном канале – $43,64 \text{ шт/м}^3$ ($0,0020 \text{ г/м}^3$).

Характеристики частиц отличаются при разных методах отбора. При полнообъемном способе обнаружены в основном прозрачные волокна среднего размера ($0,1\text{--}0,5 \text{ мм}$) (рис. 2). С применением концентрированной методики чаще всего встречались фрагменты и волокна размером от $0,3$ до 2 мм , окрашенные в разные цвета. Наиболее распространенными типами полимеров являются ПЭ, ПЭТ, ПС, ПП, полиамид (ПА), также часто фиксируется этиленвинилацетат (ЭВА).



Рис. 2. Частицы МП под различными микроскопами: а – электронный; б – световой; в – рамановский / Fig. 2. Microplastic particles under different microscopes: a - electron; b - light; c - Raman

Разница в концентрациях может быть связана не только с различными методиками, но и с изменяющейся сеткой станций (рис. 1). Однако при всех съёмках определены следующие точки максимальных накоплений: урбанизированные территории, притоки, бьефы гидроузлов. Установлено, что объём стока частиц микропластика р. Дон составляет $203,8 \text{ т}$ в год, Северским Донцом – $143,2$, Нижней Волгой – $367,1$.

Выводы

Таким образом, обнаружены высокие концентрации в реках и водохранилищах юга европейской части России – в Нижнем Дону, Северском Донце, Нижней Волге, Цимлянском, Карповском, Береславском и Варварском водохранилищах. Количество, а также морфологические и морфометрические характеристики различаются в зависимости от метода отбора проб – были применены как полнообъемный, так и концентрированный. Второй способ оказался более репрезентативным и менее склонным к статистической погрешности. Так, в 2023 г. выявлены следующие концентрации: в Дону – $94,32 \text{ шт/м}^3$, в Волге – $81,06$, в Цимлянском водохранилище – $12,3 \text{ шт/м}^3$.

В предыдущие годы содержание в пересчете на сток оказалось гораздо выше, но сам набор частиц недостаточно выраженным, в связи с чем удалось идентифицировать малую часть образцов, чтобы утверждать, что все частицы, визуальнo установленные как МП, таковым являются.

Соответственно, в 2021 и 2022 гг. определены такие концентрации: Нижний Дон – 36 и 21 шт/л, Цимлянское водохранилище – 33 и 10, Северский Донец – 38 шт/л, Нижняя Волга – 16 шт/л. В водохранилищах ВДСК наибольшее накопление наблюдается в Варваровском – 19 шт/л, меньшее в Береславском – 14, последним идёт Карповское вдхр. – 11 шт/л.

Список источников

1. Сперанская О.А., Понизова О.А., Гурский Я.Г., Цитцер О.Ю. Российский рынок пластика и пластиковых отходов // Твёрдые бытовые отходы. 2021. № 12 (186). С. 42–47. EDN: MSLLYW.
2. Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т.В. Микропластик в морской среде. М.: Научный мир, 2021. 520 с.
3. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // *Sci Advances*. 2017. Vol. 3, № 7. P. 170–182. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
4. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John W.G., Mcgonigle D., Russel A.E. Lost at sea: where is all the plastic? // *Sci*. 2004. Vol. 304 (5672). P. 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
5. Besseling E., Quik J.T., Sun M., Koelmans A.A. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study // *Environ Pollution*. 2017. Vol. 220. P. 540–548. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.001>
6. Castañeda R.A., Avlijas S., Simard M.A., Ricciardi A. Microplastic pollution in St. Lawrence River sediments // *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sci*. 2014. Vol. 71, № 12. P. 1767–1771. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0281>
7. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments // NOAA Tech. Memorandum NOS-OR&R-48. 2015. 31 p.
8. Wang W., Wang J. Investigation of microplastics in aquatic environments: An overview of the methods used, from field sampling to laboratory analysis // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2018. Vol. 108. P. 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.026>
9. Song Y.K., Hong S.H., Jang M., Kang J.H., Kwon O.Y., Han G.M., Shim W.J. Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer // *Environ Sci and Technol*. 2014. Vol. 48, № 16. P. 9014–9021. <https://doi.org/10.1021/es501757s>
10. Eriksen M., Mason Sh., Wilson S., Box C., Zellers A., Edwards W., Farley H., Amato S. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes // *Marine Pollution Bulletin*. 2013. Vol. 77, iss. 1-2. P. 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>
11. Norén F. Small plastic particles in Coastal Swedish waters // KIMO Sweden Report N-Research. 2007. P. 1–11.
12. Mu J., Zhang S., Qu L., Jin F., Fang C., Ma X., Zhang W., Wang J. Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea // *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 143. P. 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.023>
13. Stock F., Kochleus C., Bänisch-Baltruschat B., Brennholt N., Reifferscheid G. Sampling techniques and preparation methods for microplastic analyses in the aquatic environment – A review // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019. Vol. 113. P. 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.01.014>
14. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification // *Environ Sci and Technol*. 2012. Vol. 46, iss. 6. P. 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>

References

1. Speranskaya O. A., Ponizova O. A., Gursky Ya. G., Zitzer O. Yu. Russian market of plastic and plastic wast. *Solid Household Waste*. 2021;(12):42-47. (In Russ.). EDN: MSLLYW.
2. Chubarenko I. P., Esyukova E. E., Khatmullina L. I., Lobchuk O.I., Isachenko I.A., Bukanova T.V. *Microplastics in the marine environment*. Moscow: Scientific World; 2021. 520 p. (In Russ.).
3. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Advances*. 2017;3(7):170-182. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
4. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John W.G., Mcgonigle D., Russel A.E. Lost at sea: where is all the plastic? *Sci*. 2004;304(5672):838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
5. Besseling E., Quik J.T., Sun M., Koelmans A.A. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study. *Environ Pollution*. 2017;220(A):540-548. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.001>
6. Castañeda R.A., Avlijas S., Simard M.A., Ricciardi A. Microplastic pollution in St. Lawrence River sediments. *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sci*. 2014;71(12):1767-1771. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0281>
7. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. *Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments*. NOAA Tech. Memorandum NOS-OR&R-48. 2015. 31 p.
8. Wang W., Wang J. Investigation of microplastics in aquatic environments: An overview of the methods used, from field sampling to laboratory analysis. *TrAC. Trends in Analytical Chemistry*. 2018;108:195-202. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.026>

9. Song Y.K., Hong S.H., Jang M., Kang J.H., Kwon O.Y., Han G.M., Shim W.J. Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer. *Environ Sci and Technol*. 2014;48(16):9014-9021. <https://doi.org/10.1021/es501757s>
10. Eriksen M., Mason Sh., Wilson S., Box C., Zellers A., Edwards W., Farley H., Amato S. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin*. 2013;77(1-2):177-182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>
11. Norén F. Small plastic particles in Coastal Swedish waters. *KIMO Sweden Report N-Research*. 2007:1-11.
12. Mu J., Zhang S., Qu L., Jin F., Fang C., Ma X., Zhang W., Wang J. Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 2019;143:58-65. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.023>
13. Stock F., Kochleus C., Bänsch-Baltruschat B., Brennholt N., Reifferscheid G. Sampling techniques and preparation methods for microplastic analyses in the aquatic environment – A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019;113:84-92. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.01.014>
14. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environ Sci & Technol*. 2012;46(6):3060-3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>

Информация об авторе

М.А. Анциферова – аспирант, кафедра океанологии, Институт наук о Земле ЮФУ; инженер-исследователь лаборатории гидрологии и гидрохимии ЮНЦ РАН.

Information about the author

Marina A. Antsiferova – Postgraduate Student, Department of Oceanology, Institute of Earth Science, SFedU; Research Engineer of the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry, SSC RAS.

Статья поступила в редакцию 15.09.2024; одобрена после рецензирования 15.10.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 15.09.2024; approved after reviewing 15.10.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 551.509.22 (470.67)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-58-66>

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ТЕРСКО-КУМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ АРИДИЗАЦИИ

**Т.А. Асварова¹, Г.Н. Гасанов², Р.З. Усманов³, К.М. Гаджиев⁴, А.С. Абдулаева⁵,
Р.Р. Баширов⁶, К.Б. Гимбатова⁷**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального
исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ tatacvar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5285-9250>

² nikuevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6181-5196>

³ pibrdnrcran@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4046-5991>

⁴ kamil555372@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-9593>

⁵ aischat55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9056-1909>

⁶ pakduik100@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6331-2592>

⁷ kabirat1954@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7516-0901>

Аннотация. За годы исследований (2011–2023 гг.) индекс аридности де Мартонна в диапазоне значений 2013, 2015–2020 и 2022 гг. характеризуется засушливым, а в 2011, 2012, 2014, 2023 гг. – полузасушливым типом климата, различие – более чем в 2 раза. Засушливость связана с уменьшением количества осадков в 2 раза (от 372 до 190 мм) и повышением среднегодовой температуры (от 12,7 до 13,9 °С). Показано, что наибольшее влияние на величину индекса аридности оказывает коэффициент увлажнения ($R = 0,99$). Продуктивность в засушливые годы резко снижается – от 1,57 (2011 г.) до 0,16 т/га (2022 г.), различие в значениях составляет 9,8 раза.

Ключевые слова: климат, индекс аридности де Мартонна, опустынивание, аридизация, продуктивность, фитоценоз

Для цитирования: Асварова Т.А., Гасанов Г.Н., Усманов Р.З., Гаджиев К.М., Абдулаева А.С., Баширов Р.Р., Гимбатова К.Б. Влияние климатических показателей на состояние растительного покрова Терско-Кумской низменности в условиях аридизации // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-58-66>

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

Original article

THE INFLUENCE OF CLIMATIC INDICATORS ON THE STATE OF THE VEGETATION COVER OF THE TEREK-KUMA LOWLAND UNDER CONDITIONS OF ARIDIZATION

**T.A. Asvarova¹, G.N. Gasanov², R.Z. Usmanov³, K.M. Gadzhiev⁴, A.S. Abdulaeva⁵, R.R. Bashirov⁶,
K.B. Gimbatova⁷**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Precaspian Institute of Biological Resources of the Dagestan Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic Dagestan, Russia

¹ tatacvar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5285-9250>

² nikuevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6181-5196>

³ pibrdnrcran@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4046-5991>

⁴ kamil555372@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-9593>

⁵ aischat55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9056-1909>

⁶ pakduik100@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6331-2592>

⁷ kabirat1954@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7516-0901>

© Асварова Т.А., Гасанов Г.Н., Усманов Р.З., Гаджиев К.М., Абдулаева А.С., Баширов Р.Р., Гимбатова К.Б., 2025

Abstract. Over the years of research in 2011-2023, the de Martonne aridity index, in the range of values 2013, 2015-2020 and 2022, is characterized by an arid climate, and in the years 2011, 2012, 2014, 2023 - a semi-arid climate type, the difference between the aridity indices is more than 2 times. Aridity is associated with a 2-fold decrease in precipitation from 372 to 190 mm and an increase in the average annual temperature from 12.7 to 13.9 °C. It is shown that the greatest influence on the value of the aridity index is provided by the moisture coefficient factor ($R = 0.99$). Productivity in dry years sharply decreases from 1.57 (2011) to 0.16 t / ha (2022), a difference is 9.8 times.

Keywords: climate, de Martonne aridity index, desertification, aridization, productivity, phytocenosis

For citation: Asvarova T.A., Gasanov G.N., Usmanov R.Z., Gadzhiev K.M., Abdulayeva A.S., Bashirov R.R., Gimbatova K.B. The Influence of Climatic Indicators on the State of the Vegetation Cover of the Terek-Kuma Lowland Under Conditions of Aridization. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):58-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-58-66>

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

В Северо-Кавказском регионе отмечается повышение темпов деградации земель и процессов опустынивания. Для изучения, сохранения и восстановления устойчивости биологической продуктивности необходимо изучение процессов деградации почвенного покрова, приводящих к снижению продуктивности растительного покрова в экосистемах, подвергшихся естественно-антропогенной трансформации.

Авторы ряда исследований показали, что площадь деградированных и опустыненных земель в регионе северо-западного Прикаспия увеличивается за счет острозасушливого климата, засоления, дефляции, щелочной среды [1, 2] и усиления антропогенного фактора (пастбищная нагрузка) [3, 4]. В условиях динамики современного опустынивания и аридизации повышается площадь солончаков, соровых понижений до 250 тыс. га и открытых песчаных массивов [5, 6].

В настоящее время возрастает проблема глобального и регионального климатического опустынивания. Так, «при относительно стабильном количестве животных возрастает роль климатических факторов, что приводит к увеличению скорости и амплитуды изменений площади очагов опустынивания, как в сторону уменьшения, при достаточном увлажнении, так и увеличения в засушливые годы» [1, с. 16].

Солончакообразовательный процесс в почвах происходит в результате климатических и антропогенных факторов, в основном при условии близкого к поверхности залегания минерализованных грунтовых вод на территориях с засушливым климатом, величина испарения превышает количество атмосферных осадков, наличие сильных порывов ветра, нерегулируемого выпаса овец и др. усиливает негативное влияние климатического фактора.

По данным многолетнего мониторинга Росгидромета, основаниями изменения климатических показателей за период 1976–2018 гг. в целом на территории России является увеличение средней скорости роста среднегодовой температуры, которая составляет 0,47 °C/10 лет и средней скорости роста годовых сумм осадков до 2,2 %/10 лет, наиболее значительный рост сезонных осадков наблюдался весной – 5,9 %/10 лет. Следует отметить продолжающуюся тенденцию убывания летних осадков на европейской территории России: около – 4 %/10 лет – в Центральном и Приволжском, – 4,9 %/10 лет – в Южном (ЮФО) федеральных округах. В 2018 г. среднегодовое отклонение от средней температуры воздуха относительно периода 1961–1990 гг. на юге европейской территории России составило в СКФО +2,04 °C, в ЮФО +1,65 °C [7].

В ЮФО в течение 1976–2018 гг. в связи со снижением количества осадков в летний период и ростом среднегодовой температуры воздуха увеличивается риск наступления засухи.

За последние годы количество опустыненных земель Терско-Кумскую низменность увеличилось с 17 до 80–90 %, а продуктивность кормовых угодий снизилась с 5–7 до 1,0–0,5 ц/га [8, 9].

Исследований в отношении динамики почвенно-растительного покрова в условиях современного усиливающегося климатического воздействия на Терско-Кумской низменности проведено недостаточно.

Цель нашего исследования – анализ воздействия климатических показателей на состояние растительного покрова Терско-Кумской низменности в условиях аридизации.

Методы исследования

Исследования проведены в пастбищных биоценозах Кочубейской биосферной станции (КБС) ПИБР ДФИЦ РАН в полупустынной зоне Терско-Кумской низменности, в 30 км от с. Кочубей Тарумовского района равнинного Дагестана. Здесь характерны высоты до 100 м, крутизна поверхностей практически не превышает 2° . В системе ботанико-географического районирования Кавказа Терско-Кумский район относится к Восточному Предкавказью, Координаты размещения КБС 44.40720 с.ш., 46.24771 в.д. Площадь территории исследований – 1 га.

Экспериментальный участок на светло-каштановой почве, площадью 100 м^2 , разбит на 100 постоянных площадок с помощью полиэтиленового шпагата, обнесен железной сеткой во избежание погрыв фитомассы скотом. Здесь были определены урожайность (биологическая продуктивность), вес фитомассы ($\text{г}/\text{м}^2$), проективное покрытие (ПП), обилие по Друде, высота травостоя и др.

Запасы надземного растительного вещества (зеленая масса, ветошь, войлок) учитывались по методике А.А. Титляновой [10].

Для определения сухости климата использовали индекс аридности де Мартонна – $I_{DM} = P/T+10$, где P – количество осадков, мм; T – средняя годовая температура, $^\circ\text{C}$; I_{DM} – индекс аридности. Испаряемость по Н.Н. Иванову – $E_o=0,0018 \cdot (25+t)^2 \cdot (100-f)$, где t – средняя месячная температура воздуха, $^\circ\text{C}$; f – относительная влажность воздуха, %. Коэффициент увлажнения по Иванову $K = P/E_m$, где P – годовое количество осадков, мм; E_m – испаряемость, мм. Расчетным методом определялся коэффициент водопрочности агрегатов [11].

Для учета климатических характеристик использовали данные метеостанции Кочубей, Тарумовский район Республики Дагестан.

Результаты исследования

Индикатором деградации почвенного покрова изученного региона является уменьшение биологической продуктивности за 2011–2023 гг. (рис. 1).

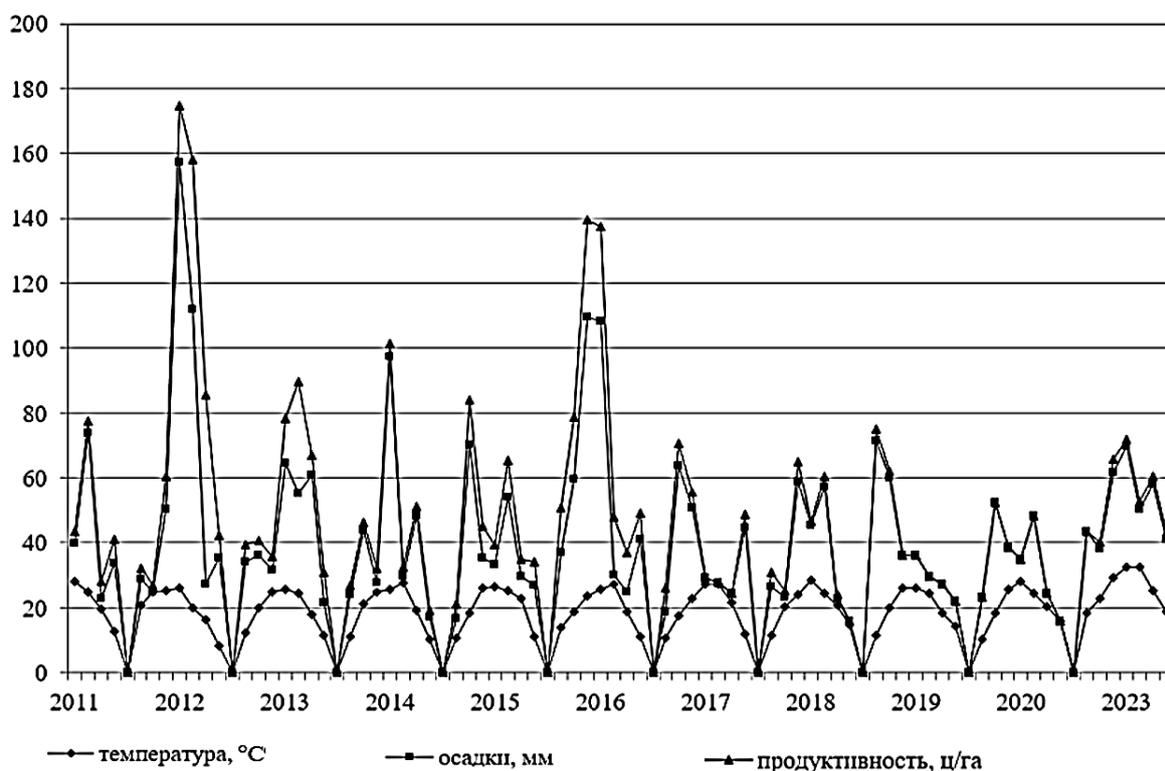


Рис. 1. Связь между урожайностью и климатическими факторами за 2011–2023 гг.
/ Fig. 1. The relationship between yield and climatic factors for 2011-2023

Выявлена прямая связь продуктивности от количества осадков и температуры за 12 лет. Необходимо отметить, что на формирование продуктивности фитоценоза влияет распределение осадков по

периодам вегетации. Климатические особенности в апреле-мае 2011 г. (сумма осадков 85 мм, температура воздуха 13,8 °С, относительная влажность воздуха 73 %) определили высокую урожайность фитоценоза (до 1,57 т/га) за счет эфемеров и эфемероидов, которая способствовала сенокосу, не характерному для данного региона. В 2012 г. увеличение осадков в июле – сентябре (102 мм, 25,8 °С, 62 %) привело к росту урожайности (6,95 т/га) за счет солянки иберийской, или сорной (курай) (*Salsola tragus* L. [*S. ibérica* (Sennen et Pau) Botsch.]). Климатические особенности в весенне-летний период 2020–2023 гг. (25,3–29,2 °С, Кув. = 0,1–0,11) повлияли на низкую урожайность 0,21–0,24 т/га.

Определены основные растительные ассоциации: эфемероидно-полынно-злаковые, полынно-злаковые, разнотравно-кострово-петросимониевые, полынно-солянковые и др.

За период исследований 2011–2016 гг. на светло-каштановой почве видовой состав растений представлен 12 видами доминантов: из сложноцветных – полынь таврическая (*Artemisia taurica* Willd.), полынь Лерха (*Artemisia lercheana* Web.ex Stechm.) (ПП – 50–55 %, обозначение обилия по Друде – сор3); из маревых – солянка иберийская, или сорная (курай) (*Salsola tragus* L. [*S. ibérica* (Sennen et Pau) Botsch.]) (ПП – 40–60 %, сор3, Soc); из злаковых – мортук пшеничный (*Eremopyrum triticeum* (Gaertn.) Nevski), мятлик луковичный (*Poa bulbosa* L.) (ПП – 60 %, сор3), костер растопыренный (*Bromus squarrosus* L.), костер кровельный (*Anisantha tectorum* L.), полевица малая (*Eragrostic minor* Host.), ячмень заячий (*Hordeum leporinum* Link.) (ПП – 30 %, сор2); мортук восточный (*Eremopyrum orientale* (L.) (jaub.et Spach (ПП – 20 %, сор1); из крестоцветных – бурачок пустынный (*Alyssum desertorum* Stapf) (ПП – 50 %, сор3); из бобовых – люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) (ПП – 20 %, сор1).

В засушливые годы (2017–2023 гг.) происходит резкое снижение флористического состава с 12 до 5–6 видов растений-доминантов. В числе доминантов остаются мятлик луковичный, мортук пшеничный, бурачок пустынный, полынь таврическая, полынь Лерха, солянка иберийская, или сорная (курай). Шесть видов растений из 12 перестали быть доминантами фитоценоза: *Bromus squarrosus*, *Anisantha tectorum*, *Eragrostic minor*, *Eremopyrum orientale*, *Hordeum leporinum*, *Medicago sativa* (ПП – 5–10 %, обилие по Друде – sp.).

Остановимся подробнее на 5 видах растений-доминантов современного экологического состояния растительного сообщества в условиях усиленного влияния климатических факторов региона исследований.

Мятлик луковичный – полупустынное эфемероидное растение. Н.А. Бедило выявлено, что «мятлик луковичный хорошо выносит вытаптывание, предположительно является индикатором будущего глобального потепления климата в Северо-Кавказском регионе. Установлено, что мятлик луковичный на Кубани является источником сверххранного и сверхпозднего питательного пастбищного корма для всех видов травоядных животных» [12, с. 104].

Бурачок пустынный и мортук пшеничный – засухоустойчивые пустынные растения, сезонные пастбищные кормовые растения для скота.

Полынь таврическая – засухоустойчивое многолетнее растение, полукустарник, она распространена в сухих степях, полупустыне. М.А. Арсланов, Г.И. Гасанов отмечают, что «при поверхностном улучшении естественных кормовых угодий на светло-каштановых среднесуглинистых почвах в Терско-Кумской низменности Прикаспия следует широко использовать полынь таврическую. Посев следует проводить в течение сентября-октября после выпадения 10–15 мм осадков нормой 3,5 млн семян/га» [13, с. 24].

Солянка иберийская – засухоустойчивое однолетнее растение, относится к группе эугалофитов, т.е. видов, для нормального онтогенеза которых необходимо избыточное засоление. Произрастает по песчаным степям группами и рассеянно. На основании комплекса экспериментальных данных солянка иберийская предложена в качестве нового лекарственного растительного сырья для получения гепатопротекторов [14].

Эти растения-доминанты используются как пастбищный корм в естественных фитоценозах полупустыни Терско-Кумской низменности.

Формирование фитомассы и видового состава является результатом совокупного действия суммы осадков, испаряемости, коэффициента увлажнения, степени и химизма засоления почвы.

Для биоклиматической оценки аридности Терско-Кумской низменности в рамках КБС использовали климатический показатель – индекс аридности за 2011–2023 гг.

Типизация климата по индексу аридности де Мартонна: < 10 – засушливый, 10–20 – полусушливый, 20–30 – субгумидный, ≥ 35 – влажный.

Период исследований 2011–2023 гг. характеризуется значительным варьированием индекса аридности де Мартонна. Засушливый период характерен для 2013 г., когда индекс аридности составил 9,8, в 2015–2020 и 2022 гг. – 9,4–7,2 и 8,1. В 2011, 2012, 2014, 2016, 2021, 2023 гг. данный показатель равен 14,1; 16,4; 10,9; 17,2; 11,1; 11,6, что в соответствии со шкалой типизации – полусухой тип климата. Индекс аридности де Мартонна варьирует более чем в 2 раза. Засушливость, как видно из данных климатических показателей, связана с уменьшением количества осадков в 2 раза (от 372 до 190 мм) и повышением среднегодовой температуры от 12,7 до 13,9 °С (таблица). Продуктивность фитоценоза в засушливые годы также резко снижается: от 1,57 (2011 г.) до 0,16 т/га (2022 г.), различие в 9,8 раза.

**Метеорологические показатели (метеостанция Кочубей, Тарумовский район)
и индекс аридности, испаряемости, коэффициента увлажнения за вегетационный период
(апрель – октябрь) 2011–2023 гг., КБС / Meteorological indicators and aridity index, vaporation,
humidity coefficient for the growing season April-October 2011-2023, KBS**

Год	Среднегодовая температура, °С	∑ осадки, мм	Испаряемость, мм/мес.	Относительная влажность воздуха, %	Коэффициент увлажнения	Индекс аридности де Мартонна	Тип климата
2011	11,7	307	134,4	81	0,19	14,1	Полусухой
2012	12,7	372	141,8	79	0,22	16,4	Полусухой
2013	12,7	222	137,5	72	0,13	9,8	Сухой
2014	12,7	248	133,8	83	0,15	10,9	Полусухой
2015	13,0	217	150,5	79	0,12	9,4	Сухой
2016	12,6	388	150,6	84	0,21	17,2	Полусухой
2017	12,8	194	148,7	86	0,11	8,5	Сухой
2018	13,2	218	157,3	82	0,12	9,4	Сухой
2019	13,3	191	150,1	86	0,11	8,2	Сухой
2020	13,6	169	176,5	67	0,08	7,2	Сухой
2021	13,2	258	154,6	71	0,14	11,1	Полусухой
2022	13,5	190	164,2	68	0,10	8,1	Сухой
2023	13,9	278	160,0	69	0,15	11,6	Полусухой

Возрастающая засушливость Терско-Кумской низменности (КБС) связана с уменьшением коэффициента увлажнения (Кув.). За 2017–2022 гг. КУ находится в пределах средних величин 0,1 и 0,18 за 2011–2016 гг., различие почти в 2,2 раза. Низкое увлажнение связано с повышенной испаряемостью, обусловленной высокими температурами воздуха.

По данным регрессионного анализа зависимости индекса де Мартонна аридности или засушливости климата от КУ, испаряемости и температуры за 2020–2023 гг. получено уравнение множественной регрессии: $Y = 1,93 - 1,06X_1 + 0,07X_2 + 84,6X_3$ ($R = 0,99$).

Рост температуры (X_1) на 1 °С приводит к уменьшению индекса аридности (Y) с 11,6 до 7,2, в среднем на 1,06, т.е. происходит увеличение засушливости. Увеличение испаряемости (X_2) на 1 % влияет на нарастание Y в среднем на 0,07. Уменьшение КУ (X_3) на 1 ед. приводит к увеличению индекса аридности (Y) в среднем на 84,6, т.е. происходит увеличение засушливости с уменьшением коэффициента увлажнения. По максимальному коэффициенту $\beta_3 = 1,284$ показано, что наибольшее влияние на величину индекса аридности (Y) оказывает коэффициент увлажнения (X_3) ($R = 0,99$).

Средняя скорость ветра за 2015–2023 гг. составляет 2,0–4,5 м/с с порывами ветра от 12 до 25 м/с и выше. Средние месячные максимальные скорости ветра примерно на 2–3 м/с выше средних скоростей и составляют преимущественно в летние месяцы 6–10 м/с.

На изменение климата в районе наших исследований на территории Кочубея оказывает большое влияние понижение уровня Каспийского моря. По данным исследований [15], с 2006 по 2020 г. на акваторию Каспийского моря выпадало наименьшее количество осадков, а процессы испарения были более интенсивными.

На рис. 2 показаны взаимосвязи испаряемости и суммы осадков, испаряемости и относительной влажности воздуха, испаряемости и скорости ветров.

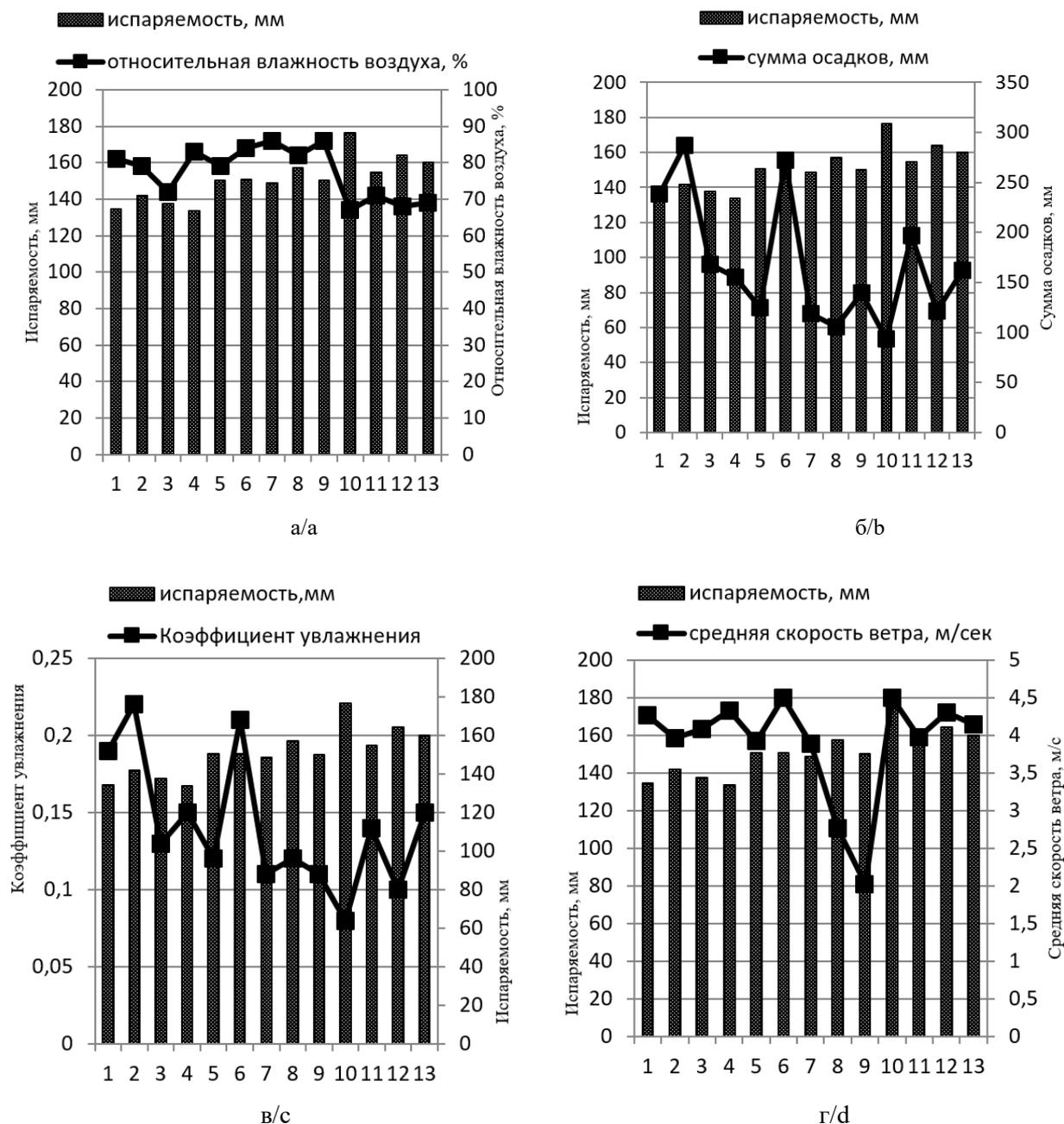


Рис. 2. Взаимосвязи влияния климатических показателей на испаряемость, мм (КБС), за 2011–2023 гг., цифры на оси абсцисс – годы исследований: 1 – 2011; 2 – 2012; 3 – 2013; 4 – 2014; 5 – 2015 и т.д.; а – испаряемость и относительная влажность воздуха, %; б – испаряемость и сумма осадков, мм; в – испаряемость и коэффициент увлажнения; г – испаряемость и средняя скорость ветра, м/с / Fig. 2. Interrelations of the influence of climatic indicators on evaporation, mm (KBS) for 2011-2023, the figures on the abscissus axis are the years of research: 1 - 2011; 2 - 2012; 3 - 2013; 4 - 2014; 5 - 2015, etc.; a - evaporation and relative humidity, %; b - evaporation and precipitation, mm; c - evaporation and humidification coefficient; d - evaporation and average wind speed, m/s

Результаты исследований показали, что повышение испарения определяется положительной связью с увеличением температуры, влажностью верхнего слоя почвы, средней скоростью ветров и с уменьшением суммы осадков.

Таким образом, повышение среднегодовой температуры воздуха и скорости ветра на фоне уменьшения количества осадков сопровождается дальнейшей аридизацией территории Терско-Кумской низменности.

Почва, являющаяся следствием действия климатических и антропогенных факторов, из-за экстремальности климата и антропогенного воздействия (нерегулируемый выпас скота) характеризуется малым содержанием гумуса и высокой склонностью к засолению [16].

Результатом усиления процессов аридизации и опустынивания на территории района исследований Терско-Кумской низменности (КБС) является увеличение площадей солончаков, практически лишенных растительного покрова.

В почвенном разрезе солончака коркового от 0–3 см к горизонту 20–40 см гранулометрический состав изменяется от суглинка легкого и среднего до глины легкой и тяжелой. Плотность почвы – 1,3 г/см³, пористость – 41,1 %, наименьшая влагоемкость – 27 %, КУ – 0,11 содержание гумуса – 0,47 % на глубине 0–5 см.

Обнаружено повышение коэффициента водоустойчивости (Кву.) к летнему сезону в 5,8 раза и снижение содержания водопрочных агрегатов в 2 раза весной. Состояние солончака коркового в поверхностном слое 0–5 см оценивается как неудовлетворительное в условиях усиленного процесса опустынивания и аридизации [17].

За годы исследований (2019–2022 гг.) в верхних горизонтах солончака коркового рассредоточивается большое количество воднорастворимых солей (2,2–2,5 %), происходит это в основном за счет близкого залегания грунтовых минерализованных вод и их испарения в условиях выпотного режима. Значительное количество солей препятствуют развитию большинства растений на солончаке корковом, в весенний период определено 3–4 вида растений: мятлик луковичный, мортук пшеничный, бурачок пустынный, солянка иберийская, или сорная. Дальнейшее увеличение солей на поверхности почвы в летний период способствует полному отсутствию растений, эти изменения отражают различие климатических условий (температура, осадки и др.) весны и лета.

Анализ влияния климатических факторов на растительный покров Терско-Кумской низменности показывает дальнейшее усиление аридизации, деградации и опустынивания почв, снижение продуктивности и видового состава фитоценоза и др.

Заключение

За период исследований 2011–2016 гг. на светло-каштановой почве видовой состав растений представлен 12 видами доминантов, в засушливые годы (2017–2023 гг.) происходит резкое обеднение флористического состава до 5–6 видов растений-доминантов: мятлик луковичный, мортук пшеничный, бурачок пустынный, полынь таврическая, полынь Лерха, солянка иберийская, или сорная (курай).

В 2015–2020 и 2022 гг. климат по индексу аридности де Мартонна оценивался как засушливый, в 2011–2014 и 2023 гг. – как полузасушливый, различие – почти в 2 раза. Продуктивность в засушливые годы также резко снижается – от 1,57 (2011 г.) до 0,16 т/га (2022 г.), различие – в 9,8 раза.

По данным регрессионного анализа зависимости индекса аридности де Мартонна или засушливости климата от Кув., испаряемости, температуры за 2020–2023 гг. получено уравнение множественной регрессии: $Y = 1,93 - 1,06X_1 + 0,07X_2 + 84,6X_3$ ($R = 0,99$). Определено, что наибольшее влияние на индекс аридности оказывает коэффициент увлажнения ($R = 0,99$).

Обнаружено в солончаке корковом повышение коэффициента водоустойчивости (Кву.) к летнему сезону в 5,8 раза и снижение содержания водопрочных агрегатов в 2 раза весной. Состояние солончака коркового в поверхностном слое 0–5 см оценивается как неудовлетворительное в условиях усиленного процесса опустынивания и аридизации.

Рассмотрение действия климатических показателей на растительный покров Терско-Кумской низменности в современных условиях показывает усиление аридизации и опустынивания, снижение продуктивности, видового состава фитоценоза и др.

Литература

1. Кулик К.Н., Петров В.И., Юферев В.Г., Ткаченко Н.А., Шинкаренко С.С. Геоинформационный анализ опустынивания северо-западного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 2 (83). С. 16–24. EDN: TJYXNB.

2. Стасюк Н. В., Добрынин Д.В. Оценка динамики опустынивания почвенного покрова низменных территорий Дагестана с использованием космических снимков // Почвоведение. 2013. № 7. С. 778–787. EDN: QCMTNR. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13070113>
3. Залибеков З.Г. Процессы опустынивания и их влияние на почвенный покров. М.: Наука, 2000. 219 с.
4. Залибеков З.Г., Мамаев С.А., Биарсланов А.Б., Курбанисмаилова А.С. Почвы аридных регионов юга России в базовой классификации почв мира // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28, № 1 (90). С. 42–52. EDN: KQQFMH. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2022-1-42-52>
5. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Картографирование сорových понижений и солончаков в Северном Прикаспии на основе многолетних данных Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 5. С. 153–165. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165>
6. Берденгалиева А.Н., Дорошенко В.В., Мелихова А.В. Анализ пространственного распределения сорových понижений в Северном Прикаспии // Науч.-агрон. журн. 2024. № 4 (123). С. 41–45. <https://doi.org/10.34736/FNC.2023.123.4.006.41-45>
7. Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2019 г. М.: Росгидромет, 2020. 17 с.
8. Гамидов И.Р. Агротехнические основы повышения продуктивности кормовых угодий Северо-Дагестанской низменности: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Нальчик, 2004. 24 с.
9. Зубкова Т.А., Ташинова Л.Н., Котенко М.Е., Ташинова А.А. Почвы равнин Западного Прикаспия и проблемы их использования // Пространство и время. 2014. Т. 5, вып. 1, ч. 2. С. 1–20. EDN: RYRKPV.
10. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности / А. А. Титлянова, Н. И. Базилевич, В. А. Снытко [и др.]; отв. ред. В. Б. Ильин. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1988. С. 109–127.
11. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агромиздат, 1986. 416 с.
12. Бедило Н.А. Мятлик луковичный (*Poa bulbosa* L.) – давно забытая пастбищная культура, как новый пастбищный вид и индикатор засушливости в Северо-Кавказском регионе // Сб. науч. тр. Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии. Краснодар, 2018. Т. 1, вып. 7. С. 104–109. EDN: XSPOOD.
13. Арсланов М. А., Гасанов Г. Н. Польшь таврическая как восстановитель потенциал а продуктивности аридных экосистем // Изв. Даг. гос. пед. ун-та. Естеств. и точн. науки. 2016. Т. 10, № 4. С. 24–29.
14. Аминова А.А. Фармакогностическое изучение солянки иберийской флоры Республики Дагестан: автореф. дис. ... канд. фармацевт. наук. Пермь, 2019. 23 с.
15. Координационный комитет по гидрометеорологии Каспийского моря (Каспком) // Информ. бюл. о состоянии уровня Каспийского моря. 2023. № 25. 7 с.
16. Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. Современные климатические тенденции изменений испарения и влажности почвы на юге европейской России // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29, № 3 (96). С. 4–14. EDN: ZUWGEV. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-3-4-14>
17. Асварова Т.А., Гасанов Г.Н., Гаджиев К.М., Баширов Р.Р., Абдулаева А.С. Оценка влияния климатических факторов на почвенно-растительный покров Терско-Кумской низменности // Почвенные и земельные ресурсы: традиционные и инновационные подходы к изучению и управлению: материалы междунар. науч.-практ. конф. / гл. ред. А. Н. Червань. Минск: БГУ, 2023. С. 126–130.

References

1. Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S. Geoinformation analysis of desertification of the northwestern Caspian. *Arid Ecosystems*. 2020;10(2):98-105. EDN: UDLLJQ. <https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
2. Stasyuk N.V., Dobrynin D.V. Assessment of the dynamics of desertification of the soil cover of lowland areas of Dagestan using space images. *Soil Science*. 2013;(7):778-787. (In Russ.). EDN: QCMTNR. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13070113>
3. Zalibekov Z.G. *Processes of desertification and their influence on the soil cover*. Moscow: Science; 2000. 219 p. (In Russ.).
4. Zalibekov Z.G., Mamaev S.A., Biarslanov A.B., Kurbanismaилова A.S. Soils of arid regions of southern Russia in the basic classification of soils of the world. *Arid Ecosystems*. 2022;12(1):34-42. EDN: FMXWER. <https://doi.org/10.1134/S2079096122010164>
5. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. Mapping of sor depressions and solonchaks in the Northern Caspian region based on long-term Landsat data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. (In Russ.). 2023;20(5):153-165. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165>
6. Berdengalieva A.N., Doroshenko V.V., Melikhova A.V. Analysis of the spatial distribution of sor depressions in the Northern Caspian region. *Scientific and Agronomic Journal*. 2024;(4):41-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.34736/FNC.2023.123.4.006.41-45>

7. *Report on the climate features in the territory of the Russian Federation for 2019*. Moscow: Roshydromet; 2020. 17 p. (In Russ.).
8. Gamidov I.R. *Agrotechnical foundations for increasing the productivity of forage lands of the North Dagestan Lowland*. Dissertation Abstract. Nalchik, 2004. 24 p. (In Russ.).
9. Zubkova T.A., Tashninova L.N., Kotenko M.E., Tashninova A.A. Soils of the plains of the Western Caspian region and problems of their use. *Space and Time*. 2014;5(1-2):1-20. (In Russ.). EDN: RYRKPV.
10. Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Snytko V.A. [et al.]. *Biological productivity of grass ecosystems. Geographical patterns and environmental features*. Novosibirsk: Science, Siberian Branch; 1988:109-127. (In Russ.).
11. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Methods for studying the physical properties of soils*. Moscow: Agronomic Publishing House; 1986. 416 p. (In Russ.).
12. Bedilo N.A. Bulbous bluegrass (*Poa bulbosa* L.) - a long-forgotten pasture crop as a new pasture species and an indicator of aridity in the North Caucasus region. *Collection of scientific works of the Krasnodar Scientific Center of Plant Protection*. Krasnodar, 2018;1(7):104-109. (In Russ.). EDN: XSPOOD.
13. Arslanov M.A., Gasanov G.N. Taurian wormwood as a restorer of the productivity potential of arid ecosystems. *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*. 2016;10(4):24-29. (In Russ.).
14. Aminova A.A. *Pharmacognostic study of the Iberian saltwort of the Dagestan Republic flora*. Dissertation Abstract. Perm, 2019. 23 p. (In Russ.).
15. Coordinating Committee for Hydrometeorology of the Caspian Sea (Caspcom). *Information bulletin on the state of the Caspian Sea level*. 2023;(25):7.
16. Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Modern climatic trends in changes in evaporation and soil moisture in the south of European Russia. *Arid Ecosystems*. 2023;29(3):4-14. (In Russ.). EDN: ZUWGEV. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-3-4-14>
17. Asvarova T.A., Gasanov G.N., Gadzhiev K.M., Bashirov R.R., Abdulayeva A.S. Assessment of the influence of climatic factors on the soil and vegetation cover of the Terek-Kuma Lowland. *Soil and land resources: traditional and innovative approaches to research and management*. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Minsk, September 21-24, 2023. A. N. Chervan (ed.). Minsk: Belarusian State University; 2023:126-130. (In Russ.).

Информация об авторах

Татьяна Азимовна Асварова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории по проблемам опустынивания и биогеохимии.

Гасан Никуевич Гасанов – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории по проблемам опустынивания и биогеохимии.

Раджаб Замилэфендиевич Усманов – доктор биологических наук, заведующий лабораторией по проблемам опустынивания и биогеохимии.

Камиль Магомедович Гаджиев – доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории по проблемам опустынивания и биогеохимии.

Айшат Саидмагомедовна Абдулаева – научный сотрудник лаборатории по проблемам опустынивания и биогеохимии.

Рашид Радифович Баширов – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории по проблемам опустынивания и биогеохимии.

Кабират Бадьровна Гимбатова – младший научный сотрудник лаборатории по проблемам опустынивания и биогеохимии.

Information about the authors

Tatiana A. Asvarova – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of the Laboratory for Desertification and Biogeochemistry.

Gasan N. Gasanov – Doctor of Science (Agriculture), Professor, Main Researcher of the Laboratory for Desertification and Biogeochemistry.

Rajab Z. Usmanov – Doctor of Science (Biology), Head of the Laboratory for Desertification and Biogeochemistry.

Kamil M. Gadzhiev – Doctor of Science (Agriculture), Senior Researcher of the Laboratory for Desertification and Biogeochemistry.

Aishat S. Abdulaeva – Researcher of the Laboratory for Desertification and Biogeochemistry.

Rashid R. Bashirov – Candidate of Science (Agriculture), Researcher of the Laboratory for Desertification and Biogeochemistry.

Kabirat B. Gimbatova – Junior Researcher of the Laboratory for Desertification and Biogeochemistry.

Статья поступила в редакцию 15.07.2024; одобрена после рецензирования 22.10.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 15.07.2024; approved after reviewing 22.10.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 551.510.41:551.577.5

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-67-79>

ГЕОХИМИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ СОЧИНСКОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ

Л.В. Захарихина^{1✉}, П.С. Лесникова², Е.В. Рогожина³, В.В. Керимзаде⁴, В.С. Бригида⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Сочи, Россия

¹ zlv63@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-5031-6087>

² lesnikovaps@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5711-2204>

³ rogojinaew@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8473-4217>

⁴ kerimzadevadim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9288-0399>

⁵ lz011@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9421-5613>

Аннотация. Изучены дождевые осадки (катионно-анионный состав традиционными методами и химический состав на 70 элементов методом ICP) в прибрежной зоне Черного моря на территории г. Сочи, в его густозаселенном районе и в парковой зоне. Выпадение осадков в период исследований происходило при разном направлении ветра. Это позволило установить спектры элементов наземного происхождения, связанные с запыленностью атмосферы, и группу элементов преимущественно морского генезиса. При северо-восточном направлении ветра в осадках избыточными являлись группа редкоземельных элементов, а также Zn, Ni, Pb, Mn, Cu, Al, Rb, As, Bi, Tl. Качественный состав этой группы фактически является зеркалом геохимических особенностей горных пород и почв региона. Глинистые горные породы в целом богаты химическими элементами по сравнению с другими типами пород, кроме того, для территории характерны разнообразные минерогенетические зоны и рудные районы, сходные по составу полезных компонентов с приведенным выше перечнем элементов, избыточных для атмосферы при направлении ветра с континента. Смена ветра на юго-восточный, поставляющий воздушные массы с моря, существенно изменила элементный состав осадков. В повышенных содержаниях в них присутствовали элементы преимущественно морского происхождения: Na > Mg > S > Sr > Cl > Br > K.

Ключевые слова: качественный состав жидких атмосферных осадков, загрязнение, микроэлементы, макроэлементы, направление ветра

Для цитирования: Захарихина Л.В., Лесникова П.С., Рогожина Е.В., Керимзаде В.В., Бригида В.С. Геохимия атмосферных осадков в прибрежной зоне Сочинского Причерноморья // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 67–79. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-67-79>

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СХЦ РАН FGRW-2024-0004, № госрегистрации 124022000094-8.

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

Original article

GEOCHEMISTRY OF ATMOSPHERIC SEDIMENTS IN THE COASTAL ZONE OF THE SOCHI BLACK SEA REGION

L.V. Zakharikhina^{1✉}, P.S. Lesnikova², E.V. Rogozhina³, V.V. Kerimzade⁴, V.S. Brigida⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Research Center “Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Sochi, Russia

© Захарихина Л.В., Лесникова П.С., Рогожина Е.В., Керимзаде В.В., Бригида В.С., 2025

¹ zlv63@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-5031-6087>

² lesnikovaps@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5711-2204>

³ rogozhinaew@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8473-4217>

⁴ kerimzadevadim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9288-0399>

⁵ lz011@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9421-5613>

Annotation. Rainfall (cation-anion composition by traditional methods and chemical composition of 70 elements by ICP method) in the coastal zone of the Black Sea in the city of Sochi was studied: in its densely populated area and in the park area. Precipitation during the study period occurred under different wind directions. This made it possible to establish the spectra of elements of terrestrial origin associated with atmospheric dustiness and a group of elements of predominantly marine origin. When the wind direction was northeast, the group of rare earth elements was abundant in precipitation, as well as Zn, Ni, Pb, Mn, Cu, Al, Rb, As, Bi, Tl. The qualitative composition of this group is actually a mirror of the geochemical characteristics of the rocks and soils of the region. The clayey rocks of the territory as a whole are rich in chemical elements in comparison with other types of rocks; in addition, the territory is characterized by various minerogenic zones and ore areas, similar in the composition of useful components to the above list of elements that are excess for the atmosphere when the wind is directed from the continent. The change in wind to southeast, supplying air masses from the sea, significantly changed the elemental composition of precipitation. Elements of predominantly marine origin were present in them at elevated contents: $Na > Mg > S > Sr > Cl > Br > K$.

Keywords: qualitative composition of liquid precipitation, pollution, microelements, macroelements, wind direction

For citation: Zakharikhina L.V., Lesnikova P.S., Rogozhina E.V., Kerimzade V.V., Brigida V.S. Geochemistry of Atmospheric Sediments in the Coastal Zone of the Sochi Black Sea Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):67-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-67-79>

Acknowledgments: this publication was prepared within the framework of the state assignment of the Federal Research Center “Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, FGRW-2024-0004, registration number 124022000094-8.

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

Введение

Состав атмосферных осадков отражает степень насыщения атмосферы химическими элементами различного происхождения. Изучение твердых и жидких осадков позволило оценить загрязнение техногенными источниками (промышленные предприятия, автомагистрали, пыление почвогрунтов) [1–3], а также связь состава атмосферы с природными факторами (породы, почвы, вулканы) [2, 4, 5].

При выпадении вблизи морских побережий осадки отражают специфику элементного состава атмосферы, обусловленную в том числе влиянием поверхности моря. Изучение осадков в прибрежных зонах показывает, что это воздействие на атмосферу может быть весьма существенным. Так, анализ осадков, выпадающих на острове Оаху (Гавайи, США), показал, что в атмосфере на аэрозоли морской соли приходится более 90 % неорганической составляющей [6]. Состав атмосферы вблизи морских побережий оказывает влияние даже на геохимический состав почвы. Исследование пространственного распределения йода в педосфере Китая показало обогащение им почв, близких к прибрежным районам, и постепенное уменьшение его концентраций по мере удаления от побережий [7].

Анализ атмосферных осадков на широкий спектр химических элементов позволил установить ряды химических элементов морского генезиса с преобладанием магния (Дальний Восток России) ($Mg > Ca > Sr > K > Mn > Ba > Fe$) [8] либо с его отсутствием (Франция) ($Cl > Na > Sr > K > SO_4 > Ca$) [9].

Сходные характеристики были установлены при изучении аэрозолей над Аравийским морем, для которых была выявлена тесная корреляция морских элементов Na, Cl и Mg [10]. Изучение аэрозолей в районах морского льда Северного Ледовитого океана показало максимальные концентрации ионов Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- в аэрозолях перед морским туманом и существенное снижение их содержаний с его образованием. Этот факт свидетельствует о хорошей растворимости данных ионов [11]. В целом известно, что морской аэрозоль представляет собой сложную смесь разномарных частиц (от 0,01 до 0,4 мкм), состоящих из таких элементов, как Na, Cl, Mg, Ca, S, K, S, Br [12, 13].

По результатам длительных (60 лет) режимных наблюдений на территории России (более чем на 300 станциях, в том числе по побережью Черного моря) выявлено, что преобладающими анионами в осадках прибрежной зоны являются хлориды. Сульфаты содержатся в меньших количествах. В пределах первых 7 км с удалением от берега моря в сторону материка концентрация сульфатов почти не меняется, далее начинает возрастать только при большем удалении от берега [14].

Соотношение анионов в атмосфере прибрежной зоны значительно меняется в зависимости от направления ветра, а также от его силы и волнения моря [15].

Для Черноморского побережья установлена ведущая роль ветрового режима в формировании условий накопления загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы [16]. Для региона преобладающими (61 %) являются ветры восточных направлений. Черноморское побережье России находится под воздействием воздушных масс, приходящих с Атлантики, Арктического бассейна, со стороны Средиземного моря и Казахстана. Местным барьером для воздушных масс с моря является линия хребтов Алек, Ахун, Дзыхра, в результате чего формируются местные ветры (фёны, бризы) [17].

Анализ этих данных показывает важную роль направления ветра в формировании состава воздушных масс Черноморского побережья. Кроме того, смена направления ветра может существенно изменить интенсивность влияния морских аэрозолей, а сравнительный анализ составов осадков при разном направлении ветра позволяет выделить спектры химических элементов, обусловленные наземным фактором и морским влиянием.

Настоящие наблюдения за химическим составом жидких атмосферных осадков выполнены в Сочи в период с 4 по 7 марта 2022 г., при смене направления ветра с северо-восточного на юго-восточный [URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/sochi/march-2022>], для достижения следующих целей: 1) определение изменения катионно-анионного состава при смене направления ветра; 2) исследование элементного состава при разном направлении ветра; 3) установление влияния моря и наземного фактора.

Материалы и методы

Изучены дождевые осадки, выпадавшие в марте 2022 г. в прибрежной зоне Черного моря, на территории г. Сочи. Дожди, прошедшие в этот период, имели разную интенсивность: крупнокапельные (03.03.2022, 07.03.2022) и мелкокапельные (04.03.2022 и 05.03.2022). Направление ветра в период наблюдений менялось с северо-восточного (03.03.2022) на юго-восточное (04.03.2022 и 05.03.2022) и вновь на северо-восточное (07.03.2022).

Опробование осадков на территории города, выполнялось по двум профилям в системе водораздел – склон – береговая линия моря (рис. 1). Профили заложены в Хостинском районе города, в междуречье нижнего течения рек Сочи и Бзугу, по берегам протекающего между ними ручья Гнилушка. Все перечисленные водотоки впадают в Черное море. Первый профиль располагается на территории сочинского парка «Дендрарий», второй характеризует зону активного городского техногенеза, примыкающую с юго-востока к парку. Верхние точки профилей располагаются на высоте 143–167 м, нижние – на высоте 5–7 м над уровнем моря.

По всем точкам наблюдений выполнены замеры содержаний CO_2 в атмосферном воздухе. Для установления возможного накопления CO_2 на территории города в течение дня замеры выполнялись в утренние и вечерние часы.

Антропогенный фактор как изученного района, так и в целом территории г. Сочи обусловлен типичной городской инфраструктурой, транспортными магистралями, ТЭЦ, бытовыми отходами и т.п. Для Сочи, исторически развивавшегося как город-курорт, нехарактерны промышленные объекты [18].

Для территорий исследований характерно преимущественное развитие осадочных глинистых горных пород, распространенных на большей части сочинского побережья. Согласно данным о кларках горных пород, слагающих верхнюю часть континентальной коры [19], в глинах и глинистых сланцах относительно других горных осадочных пород повышены содержания большого спектра химических элементов. К элементам, кларки которых примерно в два раза превышают кларки других пород, следует отнести Li, K, Rb, Cs, Al, Sn, P, As, Cu, Ni, Co, Ag, Zn, Sc, Cd, Th, Pb, Ta, V, Nb, Cr, W и редкоземельные элементы (РЗЭ), относящиеся к группам легких и средних РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy).

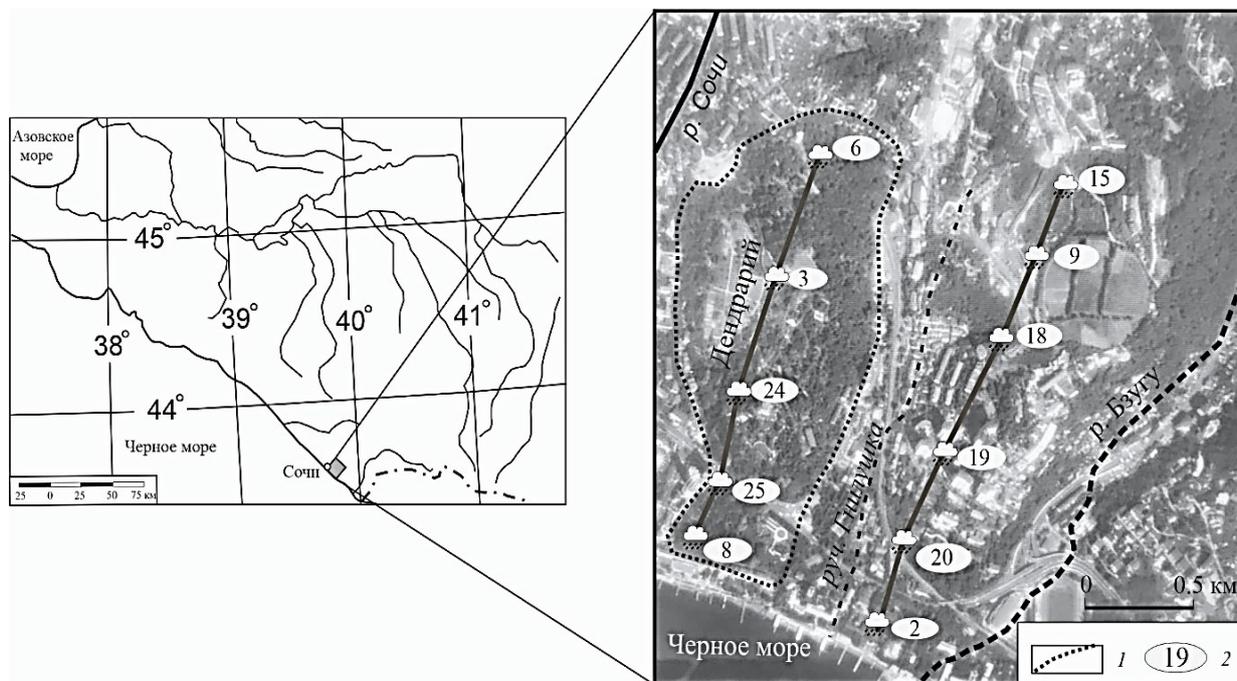


Рис. 1. Карта-схема отбора проб дождевых вод: 1 – граница Сочинского дендрария; 2 – номера точек наблюдения / Fig. 1. Map-scheme of rainwater sampling: 1 - border of the Sochi Arboretum; 2 - numbers of observation points

В соответствии со схемой минерагенического районирования [20] выше по рельефу от этого района, в верховьях рек Сочи и Мзымта, распространено несколько минерагенических зон и рудных районов с разным составом избыточных элементов в породах. Для развитых в районе юрских терригенных толщ характерно наличие полиметаллической, свинцовой, цинковой и золоторудной минерализации и оруденения, имеющих площадное распространение на десятках и сотнях квадратных километров [21]. На территории встречаются палеогеновые субщелочные породы основного и среднего составов с редкометалльно-редкоземельной специализацией [22], развита рассеянная сульфидная минерализация как в осадочных, так и в интрузивных породах [23]. Как следствие, почвы территории отличаются богатым геохимическим составом. В группу избыточных химических элементов для почв изучаемого района как на фоновом уровне, так и в условиях антропогенеза входят элементы сходного с горными породами качественного состава [18].

Отбор проб и анализ. Образцы дождевой воды отбирали с помощью бутылок и воронок, предварительно промытых дистиллированной водой. Коллекторы устанавливали непосредственно перед дождем, чтобы избежать загрязнения сухим осаждением загрязняющих веществ.

Замеры содержания CO_2 в атмосфере выполняли инструментальным методом с использованием термоанемометра AZ 8919 (AZ Instrumental Corp., Тайвань). Прибор оснащен датчиком инфракрасного типа, который измеряет концентрацию углекислого газа. Диапазон измерений – от 0 до 5000 ppm. Термоанемометр откалиброван в заводских условиях на стандартное значение 400 ppm концентрации углекислого газа в воздухе.

Для оценки макроэлементного катионно-анионного состава дождевых вод в них определены следующие показатели: водородный показатель – потенциметрически; сухой остаток – весовым методом; содержание хлорид-ионов – титрованием раствором нитрата серебра в присутствии хромата калия в качестве индикатора; сульфат-ионы – методом турбидиметрии с хлористым барием; гидрокарбонат-ионы – титрованием раствором соляной кислоты с индикатором метиловым оранжевым; ионы кальция и магния – трилометрически; концентрации ионов натрия приняты по данным ICP-AES-анализа.

Валовые содержания 70 химических элементов в атмосферных осадках установлены количественными методами – масс-спектральным и атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES).

Используемая аппаратура: масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой Elan-6100 (PerkinElmer, США); атомно-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой спектрометр Optima-4300 DV (PerkinElmer, США). Обработку масс-спектров и расчеты концентраций элементов в пробах проводили с помощью программного обеспечения масс-спектрометра.

Пределы обнаружения химических элементов определяли на основании измерения контрольной пробы (не менее трех в каждой партии).

Для подтверждения точности анализа использовали сертифицированные эталонные образцы «Микропримеси металлов в питьевой воде» High-Purity Standards (США). Полученные данные в сравнении с эталонными образцами составляли среднюю точность 1–3 %.

Оценка геохимических характеристик и загрязнения атмосферных осадков. С целью установления характера накопления элементов в дождевых водах рассчитаны коэффициенты концентраций элементов по формуле $K_c = C_i / C_f$, где C_f – фоновое содержание; C_i – содержание в конкретной точке наблюдений (г.н.).

В качестве фоновых характеристик для города приняты средние содержания элементов для дождевых осадков, отобранных в верхней части склона на территории парка «Дендрарий» (г.н. 3, 6 – «чистые» осадки, имеющие самый бедный элементный состав) (табл. 1).

Макроэлементный химический состав атмосферных вод охарактеризован с использованием формулы Курлова. Состав, согласно формуле, отображается в порядке убывания экв. % главных анионов и катионов, содержания которых превышают 15 экв. %.

Результаты и обсуждение

Катионно-анионный состав атмосферных осадков. По макроэлементному составу изученные атмосферные осадки подразделяются на два типа:

- 1) бикарбонатно-хлоридные натриево-магниевые-кальциевые;
- 2) хлоридно-бикарбонатные натриево-кальциевые-магниевые;

Безусловно, вхождение в состав преобладающих ионов всех типов вод хлорида и натрия обусловлено влиянием моря. Все воды слабоминерализованные и слабокислые (табл. 2).

Бикарбонатно-хлоридные натриево-магниевые-кальциевые воды преимущественно являются осадками, выпавшими в первый и в последний дни наблюдений на территории г. Сочи (03.03.2022, 07.03.2022) в виде крупнокапельных дождей при северо-восточном направлении ветра.

Преобладание в составе анионов бикарбонатов свидетельствует о влиянии на состав этих вод почвенного покрова. Для территории кроме нейтральных аргиллитов характерны также карбонатные мергели [20].

Хлоридно-бикарбонатный натриево-кальциевый-магниевый состав вод характерен для всех осадков, выпавших в последующие дни наблюдений при северо-восточном и юго-восточном направлениях ветра. Преобладание хлоридов в составе анионов указывает на относительно большое влияние моря на состав этих дождевых вод не только за счет ветрового режима (смена его на юго-восточный на второй день наблюдений), но и благодаря существенному очищению атмосферы после первого дня дождя от элементов наземного происхождения, связанных с запылением атмосферы.

Таблица 1 / Table 1

Элементный состав атмосферных осадков в фоновых т.н., мкг/л
/Elemental composition of atmospheric precipitation at background observation points, mcg/l

Элемент	03.03.2022		04.03.2022		05.03.2022		07.03.2022	
	т.н. 3	т.н. 6						
B	0,8	0,8	2,2	1,8	2,3	2,6	0,79	1,4
Na	321	322	3037	2343	1944	2053	307	373
Mg	44,5	46,9	384	304	256	269	64,2	67,4
Al	13,1	15,9	12	12,3	13,4	20,6	10,7	26,9
Si	30,4	37,5	16	16	25,9	48,4	16	52,3
S	156	189	602	524	933	1029	376	355
K	145	143	234	200	245	580	529	703
Ca	271	283	242	273	318	826	146	660
V	0,08	0,08	0,08	0,094	0,14	0,11	0,08	0,15
Mn	0,66	0,68	0,9	0,87	1,3	2,9	2,6	3,9
Fe	6,7	6,6	3	3,7	7,5	12,9	3,3	17,1
Ni	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,31
Cu	0,71	0,87	0,4	0,4	0,54	0,4	1,2	2
Zn	4,2	4,6	3,8	3,7	6,8	7,3	6,7	6,5
As	0,05	0,05	0,05	0,05	0,2	0,32	0,05	0,05
Br	7,9	7,9	17,2	13,9	10,5	11,5	7,9	7,9
Sr	0,94	1,1	2,5	2,1	2,1	2,9	0,87	1,8
Ba	1,3	0,48	0,33	0,46	0,52	0,97	1,1	0,96
Pb	0,28	0,38	0,83	0,79	0,98	0,65	0,49	0,53
Li	0,023	0,047	0,068	0,065	0,05	0,078	0,03	0,03
Rb	0,132	0,136	0,144	0,139	0,196	0,348	0,195	0,397
Y	0,008	0,015	0,004	0,006	0,005	0,012	0,005	0,023
Mo	0,017	0,025	0,022	0,013	0,024	0,021	0,018	0,021
Ag	0,004	0,007	0,003	0,006	0,003	0,003	0,003	0,003
Cd	0,047	0,007	0,022	0,022	0,054	0,05	0,02	0,017
Sn	0,013	0,021	0,014	0,01	0,04	0,03	0,011	0,007
Sb	0,033	0,032	0,065	0,081	0,127	0,13	0,059	0,062
Cs	0,002	0,003	0,004	0,003	0,004	0,003	0,001	0,003
La	0,009	0,016	0,005	0,007	0,021	0,012	0,01	0,018
Ce	0,022	0,03	0,011	0,012	0,041	0,026	0,019	0,04
Pr	0,002	0,006	0,001	0,001	0,001	0,003	0,002	0,005
Nd	0,008	0,016	0,004	0,005	0,006	0,01	0,005	0,022
Sm	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,004
Eu	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Gd	0,002	0,003	0,001	0,002	0,001	0,003	0,001	0,006
Dy	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003
Ho	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Er	0,001	0,002	0,0001	0,0001	0,0001	0,001	0,0001	0,002
Tm	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Yb	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Tl	0,003	0,001	0,003	0,003	0,006	0,006	0,004	0,003
Bi	0,005	0,005	0,005	0,005	0,029	0,027	0,005	0,005
Th	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
U	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002

Таблица 2 / Table 2

Макроэлементный состав дождевых вод / Macroelement composition of rainwater

Тип вод	Точка наблюдения	Статистические характеристики	pH	Содержание, мг/л						
				Мобщ*	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
I. Бикарбонатно-хлоридные натриево-магниевые кальциевые	2, 3, 9, 3/4, 8/4	Максимум	6,1	20	1,05	0,53	0,14	4,8	1,0	19,5
		Минимум	5,1	8	0,31	0,15	0,04	2,9	1,0	7,3
		Среднее	5,55 ± 0,45	13,6 ± 4,56	0,59 ± 0,34	0,38 ± 0,17	0,09 ± 0,04	3,84 ± 0,73	1,0 ± 0,0	11,22 ± 4,83
		Эквивалентный процент			48 ± 9	14 ± 4	37 ± 10	36 ± 6	7 ± 2	57 ± 7
II. Хлоридно-бикарбонатные натриево-кальциевые магниевые	6, 8, 15, 18, 19, 20, 24, 3/2, 6/2, 9/2, 18/2, 19/2, 24/2, 3/3, 6/3, 8/3, 9/3, 15/3, 18/3, 19/3, 24/3, 6/4, 9/4, 15/4, 18/4, 19/4, 24/4	Максимум	6,25	28	3,04	1,35	0,38	9,8	1,0	8,5
		Минимум	4,25	3	0,23	0,13	0,04	3,8	1,0	4,9
		Среднее	5,09 ± 0,56	16,86 ± 6,02	1,44 ± 0,95	0,47 ± 0,33	0,20 ± 0,11	5,92 ± 1,46	1,00 ± 0,0	6,53 ± 1,14
		Эквивалентный процент			56 ± 16	28 ± 18	16 ± 3	56 ± 6	7 ± 1	37 ± 5

* – Мобщ – минерализация общая.

Качественный состав избыточных химических элементов в дождевых осадках. Сходство и различие качественного состава дождевых вод отражают геохимические формулы атмосферных осадков, построенные путем ранжирования входящих в их состав химических элементов по величинам коэффициентов концентраций (табл. 3).

Анализ последовательности расположения химических элементов в формулах (далее – геохимических рядах) показывает, что все исследованные т.н. города по качественному составу атмосферы можно разделить на две группы.

При северо-восточном направлении ветра в составе осадков преобладает группа элементов, обнаруживающая связь с геохимическими особенностями почв и горных пород региона. Поступление этих химических элементов в атмосферу, безусловно, следует связывать с ее запыленностью. В состав этой группы наиболее стабильно входят РЗЭ. Кроме РЗЭ, в состав элементов наземного генезиса следует отнести: Zn, Ni, Pb, Mn, Cu, Al, Rb, As, Bi, Tl.

Перечисленные химические элементы отражают геохимическую специализацию региона, для горных пород которого, как показано выше, характерно развитие полиметаллической, свинцовой, цинковой, золоторудной (элемент спутник As) [21], редкометалльно-редкоземельной [22] и рассеянной сульфидной минерализации [23].

Для почв данной территории города отмечается повышенное содержание (относительно кларков – средних содержаний для почв континентов) Zn, Mn, Cs, Sn, As, Ta, W, Li, Bi, Cu, Ni, Pb, Co, Th, Sc, Ag, Rb, Tl. К элементам-загрязнителям в пределах городской территории относят Cu, Ni, Mg, Mn, Cd и K.

В подчиненных городских ландшафтах повышенные содержания имеют также Cs, Ga, Be, Rb, V, Fe, Li, Al и 9 РЗЭ: Dy, Tb, Sm, Ho, Eu, Gd, Sc, Y, Er [18].

Как видно, качественный элементный состав атмосферных осадков, выпавших в первый день наблюдений при северо-восточном направлении ветра, преимущественно отражает геохимические особенности горных пород и почв района исследований. Это свидетельствует о том, что в таких условиях на состав атмосферы в большей степени влияет наземный фактор, обусловленный запылением, а не поступление элементов морского генезиса.

Одна из основных задач исследования свелась к установлению ведущей роли в воздействии на атмосферу моря или материка. Об этом однозначно можно судить по соотношению в составе атмосферы надфоновых концентраций химических элементов морского или континентального генезиса.

Таблица 3 / Table 3

**Коэффициенты концентраций избыточных химических элементов для дождевых осадков
 (значения Кс в скобках) / Concentration coefficients of excess chemical elements for rainfall
 (Kc values in parentheses)**

№ Т.Н.	Кс			
	< 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1
Крупнокапельный дождь, 03.03.2022, ветер С – В. Парк «Дендрарий»				
24	–	K (7,0) – Sr (6,7) – B (6,1) – Sn (5,8) – Rb (5,1)	Ca, Ni (4,5) – Cu (4,3) – Mn (4,1) – Zn (3,9) Pb (3,8) – Na (3,1) – Fe (3,0) – Mg (2,7) – Sm, S (2,6) – Sb (2,5)	Si, Gd (2,4) – Al (2,3) – Dy (2,2) – Nd (2,0) – Ba, La (1,8) – Ce, Y (1,7) – Mo (1,6) – Li, U (1,5) – Cs (1,4) – Pr (1,3)
25	Na (13,3) – B (12,6)	Sr (7,9) – Mg (8,0) – Ca (6,5)	S (4,0) – Sb (3,6) – Mn, Cs (3,5) – Rb, Sn, Br (3,2)	Tl (2,2) – Mo (2,1) – K, Ba (1,8) – Pb (1,5) – Si, U (1,3)
8	Rb (15,3) – Mn (15,0)	Ni (5,9) – K (5,7) – Ba (4,7)	Ba (4,7) – Mg (4,4) – Cu (3,9) – Ca (3,5) – Sr (3,4) – Zn (3,3) – Sb (2,6)	Si (2,4) – Fe (2,2) – Cd (1,9) – B (1,7) – Cs (1,6) – S, Pb (1,5) – Gd (1,4) – Al, Ag (1,3) – Cl, Sn (1,2)
Санаторий				
2	Mn (14,8) – Sm (10,1)	Ce (8,9) – Fe (8,8) – La (8,2) – Nd (7,2) – Gd (6,8) – Dy (6,5) – Yb (6,1) – Pr (5,5)	Al (3,6) – Er, Si (3,5) – Mg, Eu (3,0) – Ho, Na (2,6)	U (2,1) – Cs, Sr (2,0) – Ba, Li, Ca (1,9) – Pb, V (1,8) – Rb, B (1,6) – Th, K (1,5) – Cu (1,4) – S (1,3) – Cl, Tm, Zn (1,2)
Город				
15	–	–	Sm (3,1) – Mn, Mg (2,8) – Na (2,6)	Li, Fe, Sr, Nd, Ce (2,0) – Zn, Y, Ca (1,9) – Ni, Dy (1,8) – La, Pr (1,7) – B, Al, S, Pb (1,5) – Er, Eu (1,3) – Rb, Yb (1,2)
9	–	–	K (4,9) – Cu (4,6) – Ni (4,1) – Rb (3,9) – Ag (3,8) – Zn (3,5) – Na (3,3) – Pb, Sn (2,7) – Mg (2,6)	Bi (2,3) – Cd (2,2) – Mn (1,8) – Sr, Sb, Ca (1,6) – S (1,4) – B, Cs (1,3) – Tl, Ba (1,2)
18	–	–	–	Mg (2,4) – Na (2,3) – Sr (1,3) – S, Li (1,2)
19	–	–	Na (3,8) – Mg (3,5) – Sr (3,0) – Rb, Ca (2,7) – Li (2,5)	Si, Sn (2,4) – K (2,3) – Sb (2,2) – S (1,9) – Mo (1,8) – B (1,6) – Mn, Cu (1,5) – Ni, V, Al (1,4) – Cl (1,3) – Zn, Ba, Tl, La, Ag (1,2)
20	–	–	Mg (3,0) – La, Na (2,9)	Ce (2,0) – Sr (1,8) – Yb, Mn (1,7) – Gd, Dy (1,6) – Nd, S (1,5) – Al, Fe, Sm (1,4) – Cs, Pr, Y, B (1,3) – Cl, Ca, Li, Sb (1,2)
Мелкокапельный дождь, 04.03.2022, ветер Ю – В. Парк «Дендрарий»				
6/2	–	Na (7,3) – Mg (6,7)	S (3,0) – Sb (2,5)	Pb, B (2,4) – Sr (2,1) – Li (1,9) – Br (1,8) – Cl (1,7) – Tl (1,6) – (1,4) – Mn (1,3) – Ag, Cs, V (1,2)
3/2	–	Na (9,2) – Mg (8,4)	S (3,5) – B (2,8) – Pb, Sr (2,5)	Cl (2,3) – Br (2,2) – Sb, Li (2,0) – K, Tl (1,6) – Cs (1,5) – Mn (1,3)
24/2	–	Na (8,9) – Mg (8,2)	S (3,4) – B, Sr (2,6)	Li, Pb (2,3) – Cl (2,1) – Sb, Br, Cu (1,9) – Tl (1,8) – Mn (1,6) – Ca (1,4) – Cs (1,3) – K
8/2	–	Na (7,9) – S (7,3) – Mg (7,0) – Ca (5,0)	Sb (4,4) – As (3,8) – Bi (3,7) – Tl (3,6) – Pb, Sr (3,4) – Mn (3,3) – Sn, B (2,8) – Cl (2,5)	Cd (2,1) – Zn, Cs (1,9) – Br, V (1,8) – Mo (1,4) – Li (1,4) – Cu, U, Fe, Rb, Yb (1,2)
Город				
15/2	–	Zn (7,5) – Na (7,3) – Mg (6,8)	B (4,1) – Sn (4,0) – Sr (3,8) – Ca (3,3) – S (3,2) – Cl, Mn, Cu, Bi (2,5)	Pb, Li (2,3) – K (2,1) – Sb, Rb, (1,8) – Br (1,7) – Mo (1,5) – Ni, Ag (1,4) – Cs (1,3) – Tl (1,2)
9/2	–	Na (6,4) – Mg (6,2)	Pb (4,8) – S (2,8) – B (2,6)	Mn, Sr (2,2) – Sb (2,0) – Li (1,9) – Tl, K (1,8) – Bi (1,6) – Rb, Br (1,5) – Cl, Fe (1,4) – Zn, Ca, (1,3) – Al (1,2)
18/2	–	Na (7,2) – Mg (6,5)	Pb (3,6) – S (3,1)	B (2,3) – Li (2,2) – Rb (2,1) – Sr, K (2,0) – Cu (1,9) – Sb, Zn (1,8) – Br (1,7) – Cl, Tl (1,6) – Sn (1,3) – Al (1,2)
19/2	–	Na (9,3) – Mg (8,1) – Bi (6,9)	S (3,2) – Pb (2,9)	B (2,4) – Sr (2,3) – Br (1,9) – Cl (1,8) – Tl, Sb, Sn (1,6) – Zn, Li (1,5) – Cs, V (1,2)

Для решения этой задачи проведен анализ исследуемых в атмосфере территории элементов на предмет их предпочтительного генезиса – море или континент. С этой целью рассчитаны предложенные и названные нами показатели морефильности элементов K_m как отношение кларков элементов в морской воде к кларкам элементов в земной коре ($K_m = K_{\text{морская вода}}/K_{\text{земная кора}}$). Ряд приоритетных морефильных химических элементов, имеющих предпочтительный морской генезис, ранжированных по показателю K_m , имеет вид $Cl > Br > S > Na > Mg > Sr > K > Ca$ (табл. 4).

Максимально схожий с приведенным перечнем элементов состав атмосферных осадков обнаружен в дождевых водах, отобранных на второй день наблюдений, когда направление ветра сменилось с северо-восточного на юго-восточное и, соответственно, поступление морской составляющей усилилось. Анализ этих данных позволяет выделить для осадков ряд химических элементов морского происхождения в следующей их последовательности: $Na > Mg > S > Sr > Cl > Br > K$.

Таблица 4 / Table 4

Коэффициенты морефильности химических элементов (K_m) как отношения кларков элементов для морской воды по [24] к кларкам элементов в земной коре по [25] / Morophilicity coefficients of chemical elements (K_m) as the ratio of the clarks of elements for sea water according to [24] to the clarks of elements in the earth's crust according to [25]

Элемент	K_m	Элемент	K_m	Элемент	K_m	Элемент	K_m
Cl	106,61	As	0,0011	Tl	0,00001	Mn	0,000001
Br	27,92	Rb	0,0011	V	0,00001	Pr	0,000001
S	2,72	U	0,0010	Sb	0,00001	Nd	0,000001
Na	0,45	Bi	0,0002	Ni	0,00001	Sm	0,000001
Mg	0,06	Ag	0,0001	Si	0,00001	Ce	0,0000002
Sr	0,02	Cs	0,0001	Cu	0,000005	Al	0,0000001
K	0,02	Cd	0,0001	Y	0,000004	La	0,0000001
Ca	0,01	P	0,0001	Pb	0,000003	Gd	0,0000001
Mo	0,01	Ba	0,00004	Er	0,000002	Fe	0,0000001
Li	0,01	Zn	0,00001	Dy	0,000002	Th	0,00000001

Этот спектр включает почти все вышеприведенные приоритетные морефильные химические элементы. Здесь необходимо отметить, что некоторые элементы из первой группы (преимущественно наземного генезиса) встречаются в составе избыточных элементов в осадках данного типа, но они занимают неведущие места в приведённых геохимических рядах.

Перечень избыточных элементов для атмосферы г. Сочи фактически идентичен группе элементов морского происхождения, установленных длительными режимными наблюдениями на обширной территории Дальнего Востока России ($Mg > Na > Sr > K > Ca > Mn > Ba > Fe$) [8] и во Франции ($Cl > Na > Sr > K > SO_4 > Ca$) [9].

Количественные показатели элементного состава атмосферных осадков. Максимальные показатели коэффициентов концентраций (K_c) установлены в дождевых водах, опробованных в первый день дождя в нижней части парка «Дендрарий» (т.н. 24, 25, 8) и в сходных условиях на территории санатория (т.н. 2). K_c таких элементов, как Na, B, Rb, Mn, Sm, в них превышают 10 единиц. K_c для РЗЭ на территории санатория варьируют от 8,9 до 5,3. Относительно большее загрязнение атмосферы в нижней части парка «Дендрарий» и на территории санатория нужно связывать с густым покрытием этой местности древесной растительностью. Вероятно, в морской прибрежной зоне участки, не занятые растительностью, хорошо продуваются, что не позволяет застаиваться здесь атмосферным массам и накапливаться в них загрязняющим веществам. В пользу этого свидетельствуют данные замеров содержаний CO_2 (рис. 2). Накопление CO_2 в воздухе вечером относительно утренних замеров наблюдалось также только для парка «Дендрарий». В городской зоне вариации содержаний CO_2 по результатам утренних и вечерних замеров не имели значимых различий.

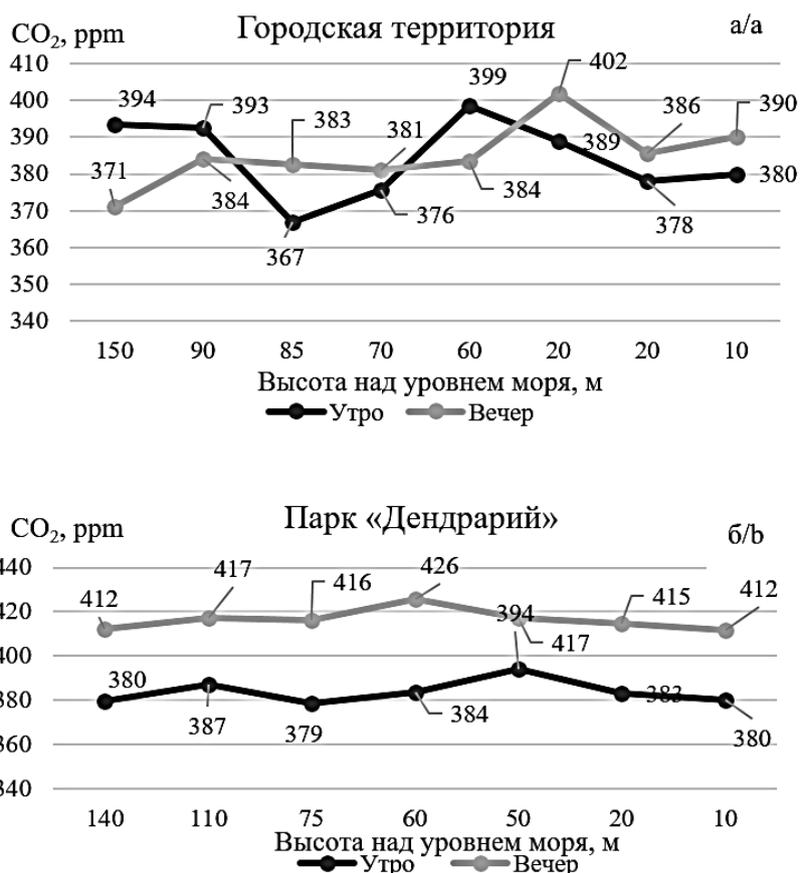


Рис. 2. Содержание CO₂ в атмосфере утром и вечером на территории г. Сочи: в его городской зоне (а) и на территории парка «Дендрарий» (б) / Fig. 2. CO₂ content in the atmosphere in the morning and evening in the city of Sochi in its urban area (a) and in the Arboretum Park (b)

В зависимости от направления ветра наблюдается разница в насыщении дождевых вод макро- и микроэлементами. При северо-восточном направлении ветра в дожде сильнее накапливаются микроэлементы (табл. 2). При смене ветра на юго-восточный в дождевых осадках наблюдается рост содержаний макроэлементов. Рост суммы макроэлементов в таких условиях происходит в основном за счет повышения в них концентраций натрия. Безусловно, насыщение осадков натрием при юго-восточном направлении ветра обусловлено влиянием моря. Атмосферные массы морской акватории в большей степени влияют на дождевые осадки в прибрежной зоне при юго-восточном направлении ветра. Это также отражается в подщелачивании дождевых вод (рН осадков повышается при преимущественно морском влиянии в среднем в 1,2 раза), повышении в них минерализации в 1,2 раза и содержаний ионов Cl в 1,5 раза (табл. 1). То есть по химическому составу дождь, имеющий преимущественно морской генезис в сравнении с дождём, отражающим наземное влияние запыленности атмосферы, более щелочной и содержит относительно повышенные концентрации макроэлементов.

Заключение

Данные исследования расширили понимание динамики элементного состава атмосферных осадков в прибрежной морской зоне при меняющихся метеорологических условиях. Оценка осадков, выпавших в течение четырех дней при смене направления ветра с северо-восточного на юго-восточный, позволила выполнить комплексный анализ вклада морских и наземных источников в химию атмосферы в прибрежной зоне Черного моря.

Типы осадков, выделенных по их катионно-анионному содержанию, показали связь макроэлементного состава атмосферы как с направлением ветра, так и с существенным ее очищением после первого дня дождя от элементов наземного происхождения, связанных с запылением атмосферы.

Влияние направления ветра является важнейшим фактором, определяющим качественный состав осадков. При ветре северо-восточного направления они преимущественно отражают геохимические особенности как горных пород, так и почв региона. Спектр избыточных химических элементов в атмосфере при данных метеорологических условиях отражает разнообразные по качественному составу региональные зоны минерализации и оруденения и фактически повторяет группу элементов, содержащихся в повышенных концентрациях в почвах района исследований. Их поступление в атмосферу, безусловно, связано с пылением почв и грунтов. При смене ветра на юго-восточный в составе осадков в большей степени преобладают элементы морского генезиса. По химическому составу дождь, имеющий преимущественно морской генезис в сравнении с дождём, отражающим наземное влияние запыленности атмосферы, более щелочной и содержит относительно повышенные концентрации макроэлементов.

Наиболее загрязненные дождевые воды отмечались для нижней части парка «Дендрарий», что связано с плохой продуваемостью этой густо покрытой древесной растительностью территории. В пользу этого свидетельствуют данные замеров содержаний CO₂. В сухую погоду накопление CO₂ к вечеру относительно утренних замеров отмечается также только для парка «Дендрарий».

Список источников

1. Camarero L., Bacardit M., Diego A., Arana G. Decadal trends in atmospheric deposition in a high elevation station: Effects of climate and pollution on the long-range flux of metals and trace elements over SW Europe // *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 167. P. 542–552. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.049>
2. Zhang Q., Li Y., Wang M., Wang K., Meng F., Liu L., Zhao Y., Ma L., Zhu Q., Xu W., Zhang F. Atmospheric nitrogen deposition: a review of quantification methods and its spatial pattern derived from the global monitoring networks // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 216. 112180. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112180>
3. Potocki M., Dixon D.A., Kurbatov A.V., Casassa G., Zamora R., Handley M.J., Introne D., Grigholm B., Korotkikh E.V., Birkel S.D., Clifford H., Mayewski P.A. Trace metal emission history captured in a Chilean ice core // *Atmospheric Environment*. 2022. Vol. 276. 119002. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119002>
4. Tripathee L., Kang S., Huang J., Sharma C.M., Sillanpää M., Guo J., Paudyal R. Concentrations of trace elements in wet deposition over the central Himalayas, Nepal // *Atmospheric Environment*. 2014. Vol. 95. P. 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.043>
5. Zakharikhina L.V., Litvinenko Yu.S., Ryakhovskaya N.I., Gainatulina V.V., Arguneeva N.Yu., Makarova M.A. The geochemical transformation of natural soils and enhancement of agrigenosis productivity due to volcanic ejecta entering the soil // *J. of Volcanology and Seismology*. 2016. Vol. 10. P. 203–217. <https://doi.org/10.1134/S0742046316030064>
6. Brennis T., Lautze N., Whittier R., Torri G., Thomas D. Understanding the origins of and influences on precipitation major ion chemistry on the Island of O‘ahu, Hawai‘i // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195, iss. 11. P. 1265. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11887-2>
7. Wang W., Wang X., Zhang B., Chi Q., Liu Q., Zhou J., Cheng X., Nie L., Liu H., Liu D., Yan T., Li L. Spatial distribution of iodine in the pedosphere of China and its influencing factors // *J. of Geochemical Exploration*. 2023. Vol. 248. Art. 107191. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107191>
8. Chudaeva V. A., Chudaev O. V., Yurchenko S. G. Chemical Composition of Precipitation in the Southern Part of the Russian Far East // *Water Resources*. 2008. Vol. 35, iss. 1. P. 58–70. <https://doi.org/10.1134/S0097807808010077>
9. Negrel P., Roy S. Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study // *Appl. Geochemistry*. 1998. Vol. 13, iss. 8. P. 941–952. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00029-8)
10. Bikkina P., Sarma V.V.S.S., Kawamura K., Bikkina S., Kunwar B., Sherin C.K. Chemical characterization of wintertime aerosols over the Arabian Sea: Impact of marine sources and long-range transport // *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 239. Art. 117749. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117749>
11. Zhao S., Yan J., Lin Q., Yao L., Park K., Jung J., Chen L., Xu S., Sun M., Wang S., Yang H., Shi J., Zhang M., Sun H. Changes in aerosol particle composition during sea fog formation events in the sea ice regions of the Arctic Ocean // *Atmospheric Environment*. 2022. Vol. 272. Art. 118943. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118943>
12. Salter M.E., Hamacher-Barth E., Leck C., Werner J., Johnson C.M., Riipinen I., Nilsson E.D., Zieger P. Calcium enrichment in sea spray aerosol particles // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43. P. 8277–8285. <https://doi.org/10.1002/2016gl070275>
13. Bertram T.H., Cochran R.E., Grassian V.H., Stone E.A. Sea spray aerosol chemical composition: elemental and molecular mimics for laboratory studies of heterogeneous and multiphase reactions // *Chemical Society Reviews*. 2018. Vol. 47. P. 2374–2400. <https://doi.org/10.1039/c7cs00008a>

14. Свистов П.Ф., Перишина Н.А., Павлова М.Т., Талаш С.С., Талаш А.С., Семенец Е.С., Полищук А.И. Временные изменения химического состава атмосферных осадков (обзор авторских сетевых наблюдений) // Климат и природа. 2021. № 2 (39). С. 50–68. EDN: VKOWPL. https://doi.org/10.51618/2220–8259_2021_2_50
15. Свистов П.Ф., Семенец Е.С., Павлова М.Т. Атмосферные осадки: 60 лет регулярных наблюдений // Природа. 2018. № 8. С. 51–57. EDN: VAKYTH. <https://doi.org/10.31857/S0032874X0000487-4>
16. Суркова Г.В. Ветровой режим прибрежной зоны Черного моря как фактор загрязнения воздуха в нижнем слое атмосферы // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2011. № 6. С. 26–33. EDN: OKMLFR.
17. Анисимов В.И., Битюков Н.А. Физическая география города-курорта Сочи. Сочи: СГУТиКД, 2007. 186 с.
18. Zakharikhina L.V., Malyukova L.S., Ryndin A.V. Genesis and geochemistry of the soils of urban landscapes of the Black Sea coast of Russia // Catena. 2022. Vol. 210. Art. 105881. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105881>
19. Grigor'ev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust // Geochemistry Int. 2003. Vol. 41, iss. 7. P. 711–718. EDN: LHRSLF.
20. Лаврищев В.А., Пруцкий Н.И., Семенов В.М., Башкиров А.Н., Греков И.И., Черных В.И., Прокуранов П.В., Сааков В.Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 200 000. Серия Кавказская. Лист К-37-V. СПб.: ВСЕГЕИ, 2002. 213 с.
21. Бозуш И.А., Черкашин В.И. Металлогения юрских осадочных комплексов Кавказа // Тр. Ин-та геологии ДНЦ РАН. 2012. Вып. 58: Региональная геология и нефтегазоносность Кавказа. С. 7–13. EDN: PXNEIL.
22. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Палеогеновая базальт-трахитовая формация Западного Кавказа: геохимическая специфика, вопросы петрогенезиса, геодинамическая типизация, металлогения // Геология и геофизика Юга России. 2018. № 4. С. 18–32. EDN: VNGDBL. <https://doi.org/10.23671/VNC.2018.4.20131>
23. Карелина Е.В., Марков В.Е., Блоков В.И. Перспективность Краснополянского района города Сочи на благороднометалльное оруденение // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18, № 4. С. 497–504. EDN: YPSRNN. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-497-504>
24. Гордеев В.В., Лисицын А.П. Средний химический состав взвесей рек мира и питание океанов речным осадочным материалом // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238, № 1. С. 225–228.
25. Ярошевский А.А. Проблемы современной геохимии. Новосибирск: НГУ, 2004. 194 с.

References

1. Camarero L., Bacardit M., Diego A., Arana G. Decadal trends in atmospheric deposition in a high elevation station: Effects of climate and pollution on the long-range flux of metals and trace elements over SW Europe. *Atmospheric Environment*. 2017;167:542–552. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.049>
2. Zhang Q., Li Y., Wang M., Wang K., Meng F., Liu L., Zhao Y., Ma L., Zhu Q., Xu W., Zhang F. Atmospheric nitrogen deposition: a review of quantification methods and its spatial pattern derived from the global monitoring networks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;216:112180. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112180>
3. Potocki M., Dixon D.A., Kurbatov A.V., Casassa G., Zamora R., Handley M.J., Introne D., Grigholm B., Korotkikh E.V., Birkel S.D., Clifford H., Mayewski P.A. Trace metal emission history captured in a Chilean ice core. *Atmospheric Environment*. 2022;276:119002. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119002>
4. Tripathee L., Kang S., Huang J., Sharma C.M., Sillanpää M., Guo J., Paudyal R. Concentrations of trace elements in wet deposition over the central Himalayas, Nepal. *Atmospheric Environment*. 2014;95:231–238. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.043>
5. Zakharikhina L.V., Litvinenko Yu.S., Ryakhovskaya N.I., Gainatulina V.V., Arguneeva N.Yu., Makarova M.A. The geochemical transformation of natural soils and enhancement of agrigenosis productivity due to volcanic ejecta entering the soil. *J. of Volcanology and Seismology*. 2016;10:203–217. <https://doi.org/10.1134/S0742046316030064>
6. Brennis T., Lautze N., Whittier R., Torri G., Thomas D. Understanding the origins of and influences on precipitation major ion chemistry on the Island of O‘ahu, Hawai‘i. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023;195(11):1265. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11887-2>
7. Wang W., Wang X., Zhang B., Chi Q., Liu Q., Zhou J., Cheng X., Nie L., Liu H., Liu D., Yan T., Li L. Spatial distribution of iodine in the pedosphere of China and its influencing factors. *J. of Geochemical Exploration*. 2023;248:107191. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107191>
8. Chudaeva V. A., Chudaev O. V., Yurchenko S. G. Chemical Composition of Precipitation in the Southern Part of the Russian Far East. *Water Resources*. 2008;35(1):58–70. <https://doi.org/10.1134/S0097807808010077>
9. Negrel P., Roy S. Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study. *Applied Geochemistry*. 1998;13(8):941–952. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00029-8)
10. Bikkina P., Sarma V.V.S.S., Kawamura K., Bikkina S., Kunwar B., Sherin C.K. Chemical characterization of wintertime aerosols over the Arabian Sea: Impact of marine sources and long-range transport. *Atmospheric Environment*. 2020;239:117749. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117749>

11. Zhao S., Yan J., Lin Q., Yao L., Park K., Jung J., Chen L., Xu S., Sun M., Wang S., Yang H., Shi J., Zhang M., Sun H. Changes in aerosol particle composition during sea fog formation events in the sea ice regions of the Arctic Ocean. *Atmospheric Environment*. 2022;272:118943. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118943>
12. Salter M.E., Hamacher-Barth E., Leck C., Werner J., Johnson C.M., Riipinen I., Nilsson E.D., Zieger P. Calcium enrichment in sea spray aerosol particles. *Geophysical Research Letters*. 2016;43(15):8277–8285. <https://doi.org/10.1002/2016gl070275>
13. Bertram T.H., Cochran R.E., Grassian V.H., Stone E.A. Sea spray aerosol chemical composition: elemental and molecular mimics for laboratory studies of heterogeneous and multiphase reactions. *Chemical Society Reviews*. 2018;47:2374–2400. <https://doi.org/10.1039/c7cs00008a>
14. Svistov P.F., Pershina N.A., Pavlova M.T., Talash S.S., Talash A.S., Semenets E.S., Polishchuk A.I. Temporal changes in the chemical composition of atmospheric precipitation (review of the author's network observations). *Climate and Nature*. 2021;(2):50–68. (In Russ.). EDN: VKOWPL. https://doi.org/10.51618/2220-8259_2021_2_50
15. Svistov P.F., Semenets E.S., Pavlova M.T. Atmospheric precipitation: 60 years of regular observations. *Nature*. 2018;(8):51–57. (In Russ.). EDN: VAKYTH. <https://doi.org/10.31857/S0032874X0000487-4>
16. Surkova G.V. Wind regime of the coastal zone of the Black Sea as a factor of air pollution in the lower layer of the atmosphere. *Lomonosov Geography Journal*. 2011;(6):26–33. (In Russ.). EDN: OKMLFR.
17. Anisimov V.I., Bityukov N.A. *Physical geography of the resort city of Sochi*. Sochi: Sochi State University of Tourism and Resort Business; 2007. 186 p. (In Russ.).
18. Zakharikhina L.V., Malyukova L.S., Ryndin A.V. Genesis and geochemistry of the soils of urban landscapes of the Black Sea coast of Russia. *Catena*. 2022;210:105881. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105881>
19. Grigor'ev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*. 2003;41(7):711–718. EDN: LHRSLF.
20. Lavrishchev V.A., Prutsky N.I., Semenov V.M., Bashkirov A.N., Grekov I.I., Chernykh V.I., Prokuronov P.V., Saakov V.G. *State geological map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Caucasian series. Sheet K-37-V*. St. Petersburg: All-Russian Scientific Research Geological Institute; 2002. 213 p. (In Russ.).
21. Bogush I.A., Cherkashin V.I. Metallogeny of Jurassic sedimentary complexes of the Caucasus. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center RAS*. Regional geology and oil and gas potential of the Caucasus. 2012;(58):7–13. (In Russ.). EDN: PXNEIL.
22. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Paleogene basalt-trachyte formation of the Western Caucasus: geochemical specifics, issues of petrogenesis, geodynamic typification, metallogeny. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2018;(4):18–32. (In Russ.). EDN: VNGDBL. <https://doi.org/10.23671/VNC.2018.4.20131>
23. Karelina E.V., Markov V.E., Blokov V.I. Prospects of the Krasnaya Polyanensky district of the city of Sochi for noble metal mineralization. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2017;18(4):497–504. (In Russ.). EDN: YPSRNN. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-497-504>
24. Gordeev V.V., Lisitsyn A.P. The average chemical composition of suspended matter in the world's rivers and the feeding of the oceans by river sedimentary material. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1978;238(1):225–228. (In Russ.).
25. Yaroshevsky A.A. *Problems of modern geochemistry*. Novosibirsk: Novosibirsk State University; 2004. 194 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Лалита Валентиновна Захарихина – доктор биологических наук, главный научный сотрудник.

Полина Сергеевна Лесникова – младший научный сотрудник.

Елена Вячеславовна Рогожина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Вадим Вагифович Керимзаде – младший научный сотрудник.

Владимир Сергеевич Бригида – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

Lalita V. Zakharikhina – Doctor of Science (Biology), Main Researcher.

Polina S. Lesnikova – Junior Researcher.

Elena V. Rogozhina – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Vadim V. Kerimzade – Junior Researcher.

Vladimir S. Brigida – Candidate of Science (Technical Science), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 01.07.2024; одобрена после рецензирования 10.09.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 01.07.2024; approved after reviewing 10.09.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 549.0+669.181.28 (470.5)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-80-87>

МИНЕРАЛОГИЯ МЕДНЫХ ШЛАКОВ УКТУССКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Юрий Викторович Ерохин¹, **Анатолий Владимирович Захаров²**,
Павел Борисович Ширяев², **Надежда Николаевна Фаррахова⁴**

^{1, 2, 3, 4} Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

¹ erokhin-yu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1651-1281>

² Zakharov-zav@yandex.ru

³ pavel.shiryayev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8790-7892>

⁴ farrakhova@igg.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3067-4044>

Аннотация. Приводятся результаты исследования минералогии медных шлаков старинного Уктусского металлургического завода, ныне расположенного на южной окраине современного г. Екатеринбурга. Здесь в 1721–1723 гг. находилась ставка горного управления уральских и сибирских заводов, сначала под руководством В.Н. Татищева, а потом генерала В.И. де Геннина, которые управляли отсюда обширным горнозаводским округом. Завод действовал с 1704 по 1749 г. и первым на Урале стал плавить медные руды. Медь на заводе выплавлялась в период с 1712 по 1726 г. из рудников Шиловского, Гумешевского и Полевского месторождений. Установлено, что медные шлаки сложены пироксеном (авгит, геденбергит) и фаялитом с постоянным присутствием плагиоклаза (битовнит), а также стекла, магнетита и различных сульфидов меди (борнит, дигенит и спинокопит). Из вторичных минералов установлен карбонат меди – малахит. Наличие сульфидов в медных шлаках Уктусского завода говорит о том, что в качестве руды при плавке использовался медный колчедан. Это подтверждают исторические сведения о введении с 1723 г. сульфидной плавки на Уктусском и заодно на рядом расположенном Екатеринбургском заводе, т.е. изученные нами шлаки были получены в 1723–1726 гг.

Ключевые слова: пироксены, фаялит, сульфиды, медные шлаки, Уктусский металлургический завод, Екатеринбург

Для цитирования: Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Фаррахова Н.Н. Минералогия медных шлаков Уктусского металлургического завода // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 80–87. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-80-87>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Свердловской области, № 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>

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

Original article

MINERALOGY OF COPPER SLAGS FROM UKTUS METALLURGICAL PLANT

Yuriy V. Erokhin¹, **Anatoly V. Zakharov²**, **Pavel B. Shiryayev³**, **Nadeshda N. Farrakhova⁴**

^{1, 2, 3, 4} Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

¹ erokhin-yu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1651-1281>

² Zakharov-zav@yandex.ru

³ pavel.shiryayev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8790-7892>

⁴ farrakhova@igg.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3067-4044>

Abstract. The paper presents the results of a study of the mineralogy of copper slags from the ancient Uktus Metallurgical Plant, now located on the southern outskirts of modern Yekaterinburg. Here in 1721–1723 was the headquarters

of the mining administration of the Ural and Siberian factories, first under the leadership of V.N. Tatishchev, and then General V.I. de Gennin, who managed a vast mining district from here. The plant operated from 1704 to 1749 and was the first in the Urals to smelt copper ores. Copper was smelted at the plant from 1712 to 1726 from the mines of the Shilovsky, Gumeshevsky and Polevskoy deposits. Our studies have established that copper slags are composed of pyroxene (augite, hedenbergite) and fayalite with the constant presence of plagioclase (bytownite), as well as glass, magnetite and various copper sulfides (bornite, digenite and spionkopite). Copper carbonate - malachite - has been identified as a secondary mineral. The presence of sulphides in the copper slags of the Uktus Metallurgical Plant indicates that copper pyrites were used as ore during smelting. This confirms the available historical information about the introduction of sulphide smelting at the Uktus Metallurgical Plant and at the nearby Yekaterinburg Metallurgical Plant in 1723. It follows from this that the slags we studied were obtained in the period 1723–1726.

Keywords: pyroxenes, fayalite, sulfides, copper slags, Uktus Metallurgical Plant, Yekaterinburg

For citation: Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Shiryayev P.B., Farrakhova N.N. Mineralogy of Copper Slags From Uktus Metallurgical Plant. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2025;(1): 80-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-80-87>

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation and the Government of the Sverdlovsk region, grant No. 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>

Введение

Средний Урал уже несколько столетий – один из главных металлургических центров России, здесь накопилось большое количество шлакоотвалов. Исследование шлаков – актуальная задача как с точки зрения экологии, так и для последующего промышленного использования, так как многие из них представляют собой потенциальную руду. При этом шлаки старинных царских заводов выступают наиболее интересным объектом, поскольку некоторые из этих предприятий тесно связаны с историческими фигурами первой величины или были свидетелями тех или иных исторических событий.

Уктусский завод – один из первых уральских предприятий царского времени и родоначальник медеплавильной промышленности на Среднем Урале. Здесь несколько лет находилась ставка горного управления уральских и сибирских заводов, сначала под руководством В.Н. Татищева, а потом генерала В.И. де Геннина, которые управляли отсюда обширным горнозаводским округом и одновременно строили более крупный Екатеринбургский завод.

В настоящей работе мы приводим результаты изучения минералогии медных шлаков Уктусского металлургического завода.

Краткая история Уктусского завода

Деревня Уктус (тогда – Иктус), по переписи Тобольского уезда, существовала уже в 1681 г. Это было первое русское поселение на территории современного г. Екатеринбурга. Немного позднее, по переписи 1695 г., на р. Уктус отмечены уже три деревни – Уктусская (Шилова), Фомина и Зыкова [1]. В начале 1700-х гг. по указу главы Сибирского приказа А.А. Вениуса в пределах рек Исеть и Уктус было решено поставить новый завод. Есть исторические сведения, что выбор места первого завода поручили сделать плотинному мастеру Каменского завода Ермоле Яковлеву и всё дело решили 5 рублей, которые собрали жители деревень вдоль р. Уктус [2]. Место выбрали на р. Уктус недалеко от впадения в р. Исеть. Строительство завода началось в декабре 1702 г. К 1704 г. на предприятии была запущена одна домна, а в 1706 г. – вторая. Одновременно на заводе работали две молотовые фабрики. В 1712 г. (по другим источникам – в 1713 г.) здесь была выплавлена первая медь на Урале. Сначала плавка производилась в одном горне, а с 1716 г. – в двух. В 1718 г. производство меди было расширено, руду плавил уже в 12 горнах. К сожалению, в этом же году завод полностью сгорел и вновь был восстановлен в 1720 г. При этом плавка меди уже производилась на 6 горнах. В 1721 г. при заводе обосновалась канцелярия горных дел, которую перевел из Кунгура новый начальник горных заводов В.Н. Татищев. В начале 1722 г. здесь же создается сибирское горное начальство, а в конце года приезжает генерал В.И. де Геннин, который и возглавил горное управление (переименованное в обер-бергamt) уральских и сибирских заводов. В 1723 г., с постройкой рядом расположенного и более крупного

Екатеринбургского завода, начальство и обер-бергamt переехали туда. В 1726 г. с Уктусского завода в Екатеринбург были вывезены все печи для плавки меди. В 1749 г. на предприятии была прекращена выплавка чугуна и ковка железа, а с 1750 г. завод перепрофилировали на дробление и промывку золотой руды из Березовского и Шилово-Исетского рудников. В 1854 г. он полностью закрылся. На данный момент от него сохранились только остатки плотины [1, 3–5].

Место отбора образцов

К сожалению, Уктусский завод и его строения до наших дней не сохранились. Территория бывшего завода застроена частными домами, в рельефе отмечаются только остатки заводской дамбы. Отвалы шлаков тоже не сохранились, но в виде отдельных кусков встречаются как вблизи плотины, так и по берегам р. Патрушихи (нынешнее название р. Уктус). Среди них в основном преобладают чугуноплавильные шлаки, но изредка встречаются и медные шлаки. Последние отличаются темной окраской с пленками вторичной медной минерализации. На свежем изломе медные шлаки имеют белесую и светло-зеленоватую окраску. Размер образцов не превышает 15 см. Медные шлаки обнаружены нами на левом берегу р. Патрушихи (привязка с GPS-навигатора – N 56°77'90.1", E 60°65'10.5") недалеко от полуразрушенной плотины (рис. 1).

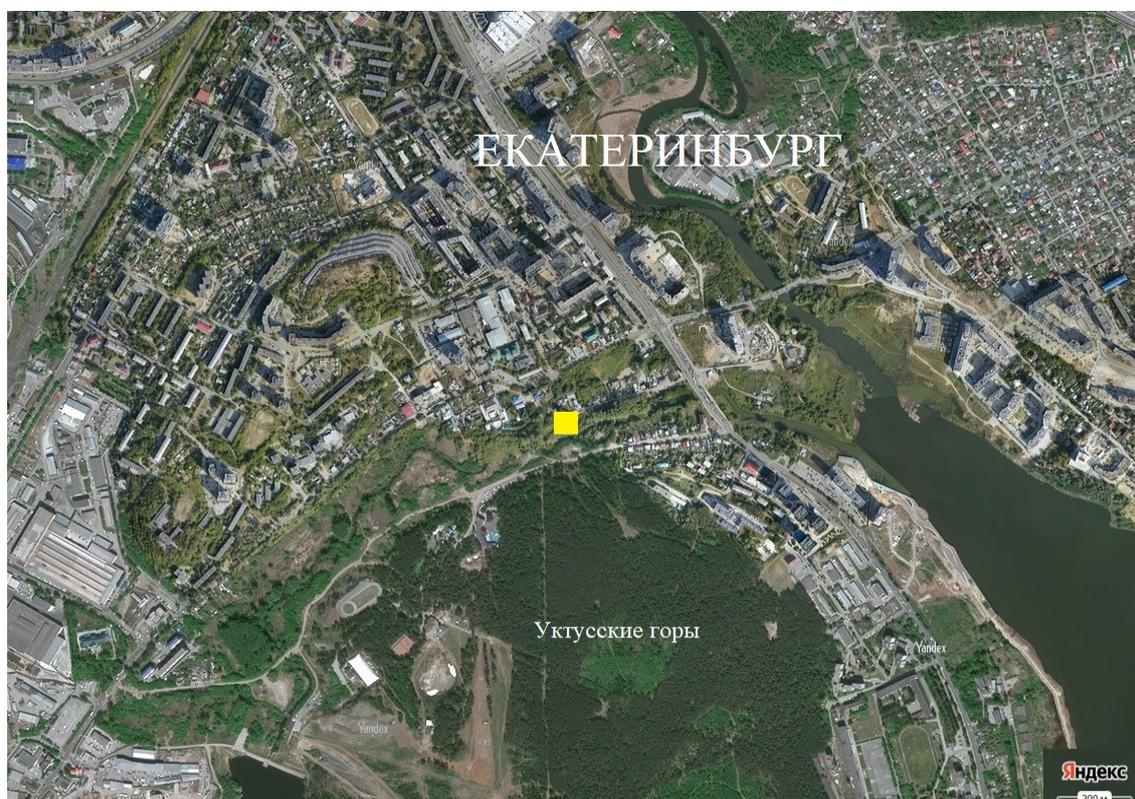


Рис. 1. Южная часть г. Екатеринбурга (получено с помощью сервиса «Яндекс.Карты»). Желтым квадратом обозначена плотина и место отбора медных шлаков / Fig. 1. The southern part of Yekaterinburg (due to the Yandex.Maps service). The yellow square indicates the dam and the place where copper slag is collected

Методы исследования

Аналитические исследования проводились в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург). Химический состав минералов и фотографии в режиме BSE (обратнорассеянных электронов) сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Н.Н. Фаррахова). Петрогенные компоненты определены на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu (аналитик Н.П. Горбунова). Потери при прокаливании установлены методом мокрой химии (аналитик Г.С. Неупокоева).

Результаты исследования

Химический состав шлака следующий, мас. %: SiO_2 – 38,36; TiO_2 – 0,17; Al_2O_3 – 13,56; $\text{FeO}_{\text{общ}}$ – 35,27; MgO – 2,95; MnO – 0,36; CaO – 7,84; K_2O – 0,36; Na_2O – 1,13; S – 0,19; Cu – 0,38; п.п.п. 0,26; сумма 100,83. Отсутствие потерь при прокаливании указывает на отсутствие вторичных изменений в породе.

В результате проведенных нами исследований оказалось, что отобранные медные шлаки сложены пироксен-фаялитовым агрегатом с постоянным присутствием плагиоклаза, а также стекла, магнетита и различных сульфидов Cu-Fe (рис. 2).

Фаялит является одним из главных минералов в шлаке, он слагает крупные скелетные игольчатые кристаллы размером до 1–2 мм по удлинению, которые образуют структуру спинифекс (рис. 2, 3). Кристаллы характеризуются зональным составом (таблица, анализ 1). В центральной части индивидов оливин попадает на границу гиалосидерита и гортонолита, слегка перевешиваясь в поле последнего. По данным пересчета он включает миналы фаялита (50,5 %), форстерита (47) и кальциооливина (2). В промежуточной зоне кристаллов оливин становится еще немного железистым и уже полностью соответствует гортонолиту. По данным пересчета он состоит из миналы фаялита (57,5 %), форстерита (38,5) и кальциооливина (3,5). В краевой части индивидов оливин становится существенно железистым и попадает в поле феррогортонолита, так как включает миналы фаялита (83 %), кальциооливина (10), форстерита (6) и тефроита (1). Интересно, что в кристаллах оливина постоянно отмечается примесь глинозема, которая от центра к краю нарастает от 0,2 до 1,2 мас. %.

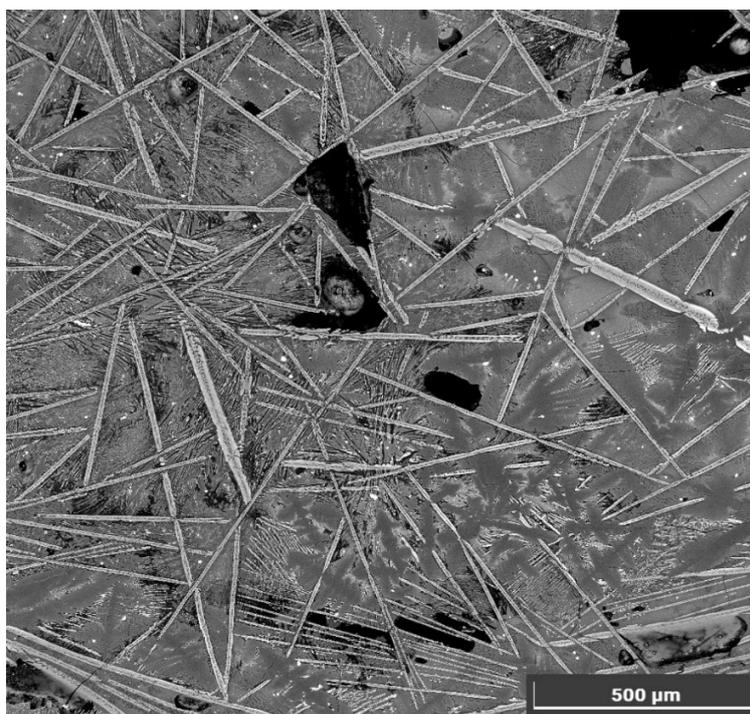


Рис. 2. Внешний вид медного шлака Уктусского завода со структурой спинифекс, которая выражена иголками фаялита (BSE-фото, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123) / Fig. 2. The appearance of copper slag from the Uktus plant with a spinifex structure, which is expressed by fayalite needles (BSE photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123)

Пироксен тоже относится к главным минералам в шлаке, он слагает короткопризматические индивиды (рис. 3), размером до 0,5 мм по удлинению. Кристаллы характеризуются зональным составом (таблица, анализ 2–3). В центральной части индивидов пироксен более магниезильный (MgO – до 8,6 мас. %) и по составу попадает в поле авгита. При этом он является кальциодефицитным и в основном глиноземистым. Краевая часть индивидов пироксена менее магниезильна и по составу попадает в поле геденбергита. При этом он становится более кальциевым и менее глиноземистым. Визуально авгит преобладает над геденбергитом, в BSE-режиме он выглядит более темным.

Битовнит образует в шлаке длиннопризматические до игольчатых индивиды размером до 0,5 мм по удлинению. В BSE-режиме минерал выглядит черным. Представительный состав плагиоклаза следующий, мас. %: SiO₂ – 47,80; Al₂O₃ – 30,23; Fe₂O₃ – 2,79; CaO – 16,66; Na₂O – 1,69; K₂O – 0,38, который хорошо рассчитывается по эмпирической формуле битовнита – (Ca_{0,83}Na_{0,15}K_{0,02})_{1,00} [(Al_{1,66}Si_{2,23}Fe³⁺_{0,11})_{4,00}O₈].

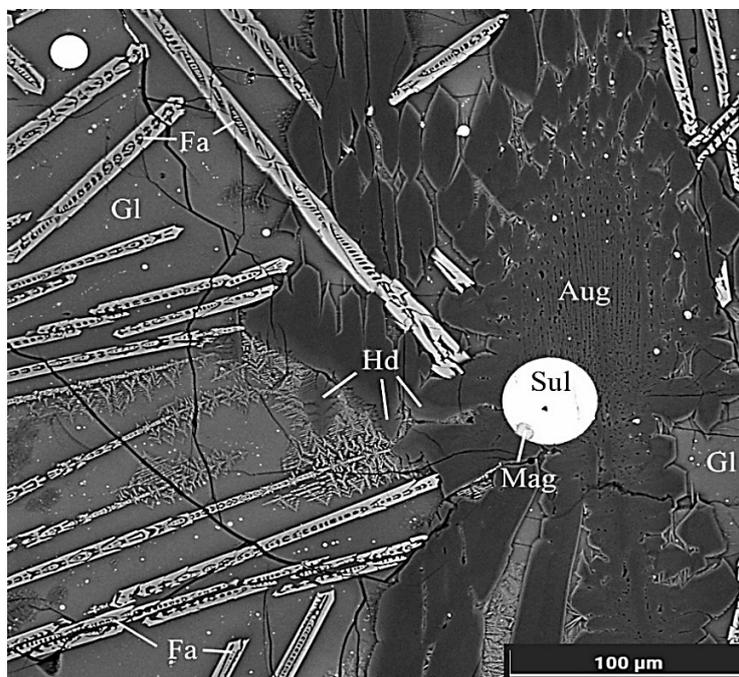


Рис. 3. Взаимоотношения минералов и стекла в медном шлаке: Fa – фаялит; Aug – авгит; Hd – геденбергит; Gl – стекло; Mag – магнетит; Sul – сульфиды (BSE-фото, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123) / Fig. 3. Relationships between minerals and glass in copper slag: Fa - fayalite; Aug - augite; Hd - hedenbergite; Gl - glass; Mag - magnetite; Sul - sulfides (BSE photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123)

Представительные составы оливина и пироксена, мас. %
/ Representative compositions of olivine and pyroxene, wt. %

Анализ	Примесь							Сумма
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	
1ц	34,63	–	0,22	41,64	0,40	21,75	1,36	100
1пр	33,20	–	0,54	46,10	0,38	17,51	2,27	100
1кр	29,07	–	1,20	60,77	0,72	2,41	5,83	100
2ц	43,89	0,40	11,29	17,37	0,23	8,59	18,23	100
2кр	42,54	0,76	9,82	22,05	–	3,03	21,80	100
3ц	43,88	0,43	11,25	17,04	0,24	8,58	18,58	100
3кр	44,17	1,01	7,13	22,67	0,19	2,91	21,92	100
Эмпирические формулы								
1ц	(Fe _{1,01} Mg _{0,94} Ca _{0,04} Mn _{0,01}) _{2,00} [(Si _{0,99} Al _{0,01}) _{1,00} O ₄]							
1пр	(Fe _{1,15} Mg _{0,77} Ca _{0,07} Mn _{0,01}) _{2,00} [(Si _{0,98} Al _{0,02}) _{1,00} O ₄]							
1кр	(Fe _{1,66} Ca _{0,20} Mg _{0,12} Mn _{0,02}) _{2,00} [(Si _{0,95} Al _{0,05}) _{1,00} O ₄]							
2ц	(Ca _{0,75} Fe _{0,25}) _{1,00} (Mg _{0,49} Fe _{0,30} Al _{0,20} Mn _{0,01}) _{1,00} [(Si _{1,68} Al _{0,31} Ti _{0,01}) _{2,00} O ₆]							
2кр	(Ca _{0,92} Fe _{0,08}) _{1,00} (Fe _{0,65} Mg _{0,18} Al _{0,17}) _{1,00} [(Si _{1,69} Al _{0,29} Ti _{0,02}) _{2,00} O ₆]							
3ц	(Ca _{0,76} Fe _{0,24}) _{1,00} (Mg _{0,49} Fe _{0,30} Al _{0,20} Mn _{0,01}) _{1,00} [(Si _{1,68} Al _{0,31} Ti _{0,01}) _{2,00} O ₆]							
3кр	(Ca _{0,94} Fe _{0,06}) _{1,00} (Fe _{0,70} Mg _{0,17} Al _{0,12} Mn _{0,01}) _{1,00} [(Si _{1,76} Al _{0,21} Ti _{0,03}) _{2,00} O ₆]							

Примечание. 1 – фаялит; 2ц, 3ц – авгит; 2кр, 3кр – геденбергит; ц – центр зерна; пр – промежуточная часть; кр – краевая часть.

Стекло выполняет интерстиции между скелетными кристаллами фаялита, индивидами пироксена и плагиоклаза. Представительный состав стекла следующий, мас. %: SiO_2 – 47,15; TiO_2 – 0,24; Al_2O_3 – 18,69; FeO – 16,41; MnO – 0,23; MgO – 0,36; CaO – 11,89; Na_2O – 2,88; K_2O – 2,14. На диаграмме TAS это стекло попадает в поле умеренно щелочных базальтов (трахибазальтов), т.е. относится к основным породам.

Магнетит встречается в шлаке крайне редко. Он отмечается исключительно в виде отдельных изометричных включений, размером до 10 мкм, в сульфидных сферулах (рис. 3). По составу магнетит отличается повышенным содержанием меди (CuO – до 12,4 мас. %, или 36 % минала купрошпинели) и глинозема (Al_2O_3 – до 2,3 мас. %, или 5,5 % минала герцинита) и имеет формулу $(\text{Fe}^{2+}_{0,64}\text{Cu}_{0,36})_{1,00}(\text{Fe}^{3+}_{1,89}\text{Al}_{0,11})_{2,00}\text{O}_4$.

Сульфиды рассеяны по всей матрице шлака, образуя мелкие и относительно крупные сферулы (шарики), размером до 100 мкм в диаметре (рис. 3, 4). Интересно, что они отличаются по составу – мелкие более чистые и медистые, а крупные имеют структуры распада и более железистые. Химический состав мелких шариков следующий, мас. %: S – 21,60–22,11; Fe – 2,90–6,57; Cu – 69,78–74,77, этот сульфид достаточно хорошо пересчитывается на формулу дигенита: Cu_9S_5 [6]. При этом химический состав крупных шариков резко отличается. Основная матрица, т.е. более темный сульфид, имеет состав, мас. %: S – 29,97; Fe – 11,05; Cu – 58,65, что близко к формуле борнита: Cu_5FeS_4 [7]. Ориентированные полосовидные выделения (по всей видимости, структуры распада) в матрице борнита отличаются меньшим содержанием железа, мас. %: S – 28,39; Fe – 2,23; Cu – 69,37, что приближается к формуле спионкопита: $\text{Cu}_{39}\text{S}_{28}$ [8].

С краев и по трещинам сульфидные сферулы замещаются маломощным агрегатом, не более 10 мкм, зеленого карбоната меди – малахита (рис. 4).

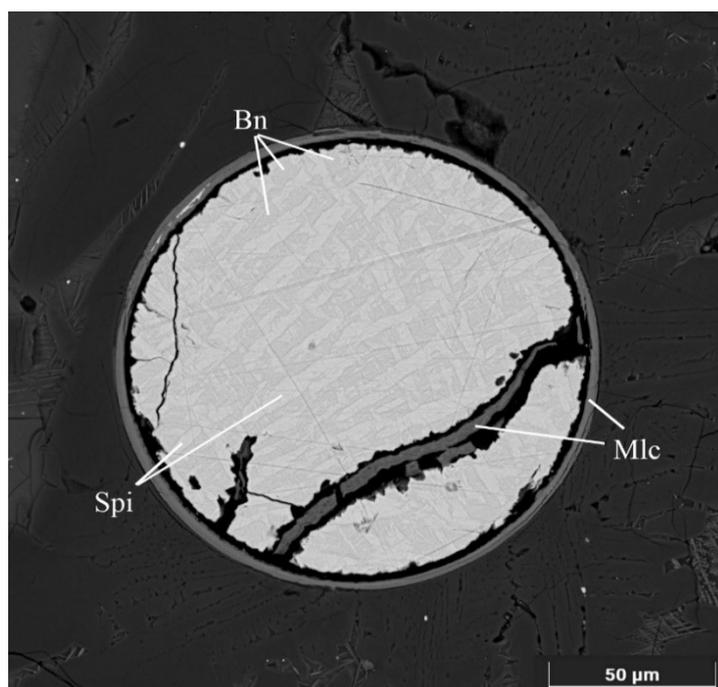


Рис. 4. Строение сульфидной сферулы: Bn – борнит; Spi – спионкопит; Mlc – малахит (BSE-фото, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123) / Fig. 4. Structure of sulfide spherule: Bn - bornite; Spi - spionkopite; Mlc - malachite (BSE photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123)

Обсуждение результатов исследования

По своему минеральному составу (с преобладанием фаялита, пироксенов и сульфидов) изученное вещество напоминает медные шлаки рядом расположенных Сысертского [9] и Благодарного [10] заводов. Наличие сульфидов в медных шлаках Уктусского завода говорит о том, что в качестве руды при плавке использовался медный колчедан.

Известно, что медная руда на Уктусский завод поставлялась с трех рудников – Шиловского, Гумешевского и Полевского [11, 12]. Шиловский рудник был открыт в 1703 г. в 15 км западнее Уктусских гор [13]. Гумешевский и Полевской рудники расположены в 40–43 км южнее г. Екатеринбурга (в пределах современного г. Полевского). Гумешевский рудник был открыт в 1702 г., а Полевской – в 1710-м [12]. При этом на первых порах на рудниках добывались, а на Уктусском заводе (начиная с 1712 или 1713 гг.) плавилась исключительно окисные медные руды. Дело в том, что только в декабре 1722 г. на Уктусском заводе в присутствии генерала В.И. де Геннина была проведена первая на Урале опытная плавка сульфидных руд [5]. Начальник уральских заводов, будучи урожденным немцем, предпочитал выплавку меди именно из сульфидной руды, так как она тогда считалась передовой европейской технологией. Это особо отмечается в его письме к своему рудознатцу берг-шрейберу И.К. Патрушеву накануне открытия Екатеринбургского завода, т.е. в 1723 г.: «Вели как возможно спешить, чтоб хотя бы одна медная плавильная печь в Екатеринбурге в ходу была, и вели зачинать плавить токмо с колчеданом. И на Уктусе вели також плавить, чтоб добрый роштейн родился...» [14, с. 43]. Таким образом, с 1723 г. на Уктусском заводе стали плавить медь из сульфидных руд, которые также поставлялись с Шиловского и Полевского рудников. В геологическом плане они представляли собой скарновые месторождения с медно-сульфидной и магнетитовой минерализацией [15].

Косвенным доказательством, что изученный шлак получился при плавлении именно сульфидных руд, является находка щелочного стекла. Ведь в те времена для плавки колчедана использовали необычный флюс – так называемый цыренный песок (морская соль) [12].

Интересно, что нами обнаружены медные шлаки достаточно узкого временного интервала (1723–1726 гг.), так как уже в 1726 г. медное производство на Уктусском заводе было прекращено, а печи вывезены на Екатеринбургский завод, где в том же году был основан монетный (платный) двор для печати медной монеты [16]. Эта информация может оказаться полезной для археологов, изучающих историю г. Екатеринбурга.

Заключение

Таким образом, нами впервые изучена минералогия медных шлаков Уктусского металлургического завода, действовавшего в период с 1704 по 1749 г. Установлено, что медные шлаки сложены пироксеном (авгит, геденбергит) и фаялитом с постоянным присутствием плагиоклаза (битовнит), а также стекла, магнетита и различных сульфидов меди (борнит, дигенит и спионкопит). Изученные шлаки образовались в 1723–1726 гг. в результате плавки сульфидных руд (медный колчедан).

Список источников

1. *Займогов А.И.* Археологическое исследование на месте Уктусского молотового железоделательного завода. Екатеринбург: Грачёв и партнёры, 2012. 35 с.
2. *Кафенгауз Б.Б.* История хозяйства Демидовых в XVIII–XIX вв. (опыт исследования по истории уральской металлургии). М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 1. 524 с.
3. Металлургические заводы Урала XVII–XX вв.: энциклопедия / гл. ред. В.В. Алексеев. Екатеринбург: Академкнига, 2001. 536 с.
4. *Байдин В.И., Грачёв В.Ю., Коновалов Ю.В., Мосин А.Г.* Уктус, Уктусский завод и его окрестности в XVII–XVIII вв. Екатеринбург: Грачёв и партнёры, 2011. 68 с.
5. *Корепанов Н.С.* Уктус – исток Екатеринбурга. Екатеринбург: Грачёв и партнёры, 2012. 40 с.
6. *Buerger N.W.* X-ray evidence of the existence of the mineral digenite, Cu_9S_5 // *Am. Mineralogist*. 1942. Vol. 27. P. 712–716.
7. *Harrington B.J.* On the Formula of Bornite // *American J. of Sci.* 1903. Vol. s4-16, iss. 92. P. 151–154. <https://doi.org/10.2475/ajs.s4-16.92.151>
8. *Goble R.J.* Copper sulfides from Alberta: Yarrowite Cu_9S_8 and Spionkopite $\text{Cu}_{39}\text{S}_{28}$ // *Can. Mineralogist*. 1980. Vol. 18. P. 511–518.
9. *Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В.* Минералогия медных шлаков Сысертского железоделательного завода, Средний Урал // *Минералогия*. 2023. Т. 9, № 2. С. 30–40. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-2-3>
10. *Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В.* Шлаки Благодатного медеплавильного завода (состав и геоэкология) // *Изв. вузов. Горн. журн.* 2021. № 5. С. 75–86. EDN: FELQLM. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-5-75-86>
11. *Прокин В.А.* История изучения и промышленного освоения рудных месторождений Урала // *Литосфера*. 2008. № 1. С. 100–119. EDN: JVHJDZ.

12. Генин В.И. Описание уральских и сибирских заводов. Екатеринбург: Грачёв и партнёры, 2022. 491 с.
13. Данилевский В.В. Русская техника. Л.: Ленингр. газ.-журн. и кн. изд-во, 1949. 348 с.
14. Корепанов Н.С. В раннем Екатеринбурге (1723–1781 гг.). Екатеринбург: Банк культурной информации, 2001. 251 с.
15. Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. Геологические маршруты по Екатеринбургью (коренные вопросы геологии и полезных ископаемых). Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001. 227 с.
16. Черноухов А.В. Обзор фонда Екатеринбургского монетного двора // Вспомогательные исторические дисциплины. Свердловск: УрГУ, 1974. С. 41–50.

References

1. Zaimogov A.I. *Archaeological research at the site of the Uktus hammer ironworks plant*. Yekaterinburg, Grachev and Partners; 2012. 35 p. (In Russ.).
2. Kafengauz B.B. *History of the Demidov household in the 18th-19th centuries (research experience on the history of Ural metallurgy)*. Moscow, Leningrad: Publ. House of the USSR Academy of Sciences; 1949, vol. 1, 524 p. (In Russ.).
3. Alexeev V.V., ed. *Metallurgical plants of the Urals in the 17th-20th centuries*. Encyclopedia. Yekaterinburg: Academic Book; 2001. 536 p. (In Russ.).
4. Baidin V.I., Grachev V.Yu., Konovalov Yu.V., Mosin A.G. *Uktus, Uktus plant and its surroundings in the 17th-18th centuries*. Yekaterinburg: Grachev and Partners; 2011. 68 p. (In Russ.).
5. Korepanov N.S. *Uktus - the source of Yekaterinburg*. Yekaterinburg: Grachev and Partners; 2012. 40 p. (In Russ.).
6. Buerger N.W. X-ray evidence of the existence of the mineral digenite, Cu_9S_5 . *American Mineralogist*. 1942;27:712-716.
7. Harrington B.J. On the Formula of Bornite. *American Journal of Science*. 1903;s4-16(92):151-154. <https://doi.org/10.2475/ajs.s4-16.92.151>
8. Goble R.J. Copper sulfides from Alberta: Yarrowite Cu_9S_8 and Spionkopite $\text{Cu}_{39}\text{S}_{28}$. *Canadian Mineralogist*. 1980;18:511-518.
9. Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V., Leonova L.V. Mineralogy of copper slags of the Sysert ironworks plant, Middle Urals. *Mineralogy*. 2023;9(2):30-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-2-3>
10. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. Slags of the Blagodatny copper smelter (composition and geoecology). *Minerals and Mining Engineering*. 2021;(5):75-86. (In Russ.). EDN: FELQLM. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-5-75-86>
11. Prokin V.A. History of the study and industrial development of ore deposits of the Urals. *Lithosphere*. 2008;(1):100-119. (In Russ.). EDN: JVHJDZ.
12. Gennin V.I. *Description of the Ural and Siberian plants*. Yekaterinburg: Grachev and Partners; 2022. 491 p. (In Russ.).
13. Danilevsky V.V. *Russian technology*. Leningrad: Leningrad Newspaper, Magazine and Book Publ.; 1949. 348 p. (In Russ.).
14. Korepanov N.S. *In early Yekaterinburg (1723-1781)*. Yekaterinburg: Bank of Cultural Information; 2001. 251 p. (In Russ.).
15. Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. *Geological routes in Yekaterinburg (fundamental issues of geology and minerals)*. Yekaterinburg: Publ. House of Ural State Mining University; 2001. 227 p. (In Russ.).
16. Chernoukhov A.V. Review of the Yekaterinburg Mint Collection. *Auxiliary Historical Disciplines*. Sverdlovsk: Ural State University; 1974:41-50. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю.В. Ерохин – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник.

А.В. Захаров – научный сотрудник.

П.Б. Ширяев – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник.

Н.Н. Фаррахова – научный сотрудник.

Information about the authors

Yu.V. Erokhin – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Leading Researcher.

A.V. Zakharov – Researcher.

P.B. Shiryayev – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Researcher.

N.N. Farrakhova – Researcher.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024; одобрена после рецензирования 15.11.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 09.10.2024; approved after reviewing 15.11.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 553.98(470.41)+553.98.041

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-88-96>

ОНТОГЕНЕЗ УГЛЕВОДОРОДОВ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Александр Вячеславович Лобусев¹, Ленара Наилевна Салахова²✉, Виталий Анатольевич Бочкарев³, Юлия Александровна Антипова⁴

^{1, 2, 4} Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия

³ LUKOIL Upstream Mexico, Мехико, Мексика

¹ Lobusev.A@gubkin.ru

² salahova.lenara@yandex.ru ✉

³ vitbochkarev@gmail.com

⁴ vert225@gmail.com

Аннотация. Акватория Каспийского моря по своеобразным условиям формирования залежей углеводородов отчетливо подразделяется на северную, центральную и южную части, по каждой из которых дано обоснование генерационно-миграционно-аккумуляционной системы формирования, переформирования и разрушения скоплений нефти и газа в палеозойских, мезозойских и кайнозойских отложениях, а также раздельный прогноз нефтегазоносности выделенных территорий. Основное внимание обращалось на источник углеводородов, определивший неповторимые условия формирования месторождений на путях миграции и в зонах аккумуляции в пределах каждой части моря. При этом северная и средняя части акватории моря имеют двухэтапную историю онтогенеза углеводородов. В каждой из них потеря связи на втором этапе с источником генерации углеводородов является основной причиной разрушения скоплений нефти. Выявленные различия следует учитывать при прогнозе преимущественной продуктивности разреза отложений, а также при размещении геолого-разведочных работ.

Ключевые слова: акватория, Каспийское море, северный Каспий, средний Каспий, южный Каспий, формирование, переформирование, нефть, газ, генерация, миграция, аккумуляция

Для цитирования: Лобусев А.В., Салахова Л.Н., Бочкарев В.А., Антипова Ю.А. Онтогенез углеводородов Каспийского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 88–96. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-88-96>

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

Original article

ONTOGENESIS OF HYDROCARBONS IN THE CASPIAN SEA

Alexander V. Lobusev¹, Lenara N. Salakhova²✉, Vitaly A. Bochkarev³, Yulia A. Antipova⁴

^{1, 2, 4} Russian Gubkin University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

³ LUKOIL Upstream Mexico, Mexico, Mexico

¹ Lobusev.A@gubkin.ru

² salahova.lenara@yandex.ru ✉

³ vitbochkarev@gmail.com

⁴ vert225@gmail.com

Abstract. The water area of the Caspian Sea, according to the peculiar conditions of formation of hydrocarbon deposits and other signs, is clearly divided into northern, central and southern parts, for each of which a justification is given for the generation-migration-accumulation system of formation, reformation and destruction of oil and gas accumulations in Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic deposits, as well as a separate forecast of the oil and gas potential of the selected territories and productive deposits. The main attention was paid to the source of hydrocarbons, which determined the unique conditions for the formation of deposits on migration routes and in accumulation zones within each part of the sea. At the same time, the Northern and Middle parts of the sea have a two-stage history of hydrocarbon ontogenesis. In each of these parts, the loss of connection at the second stage

© Лобусев А.В., Салахова Л.Н., Бочкарев В.А., Антипова Ю.А., 2025

with the source of hydrocarbon generation is the main reason for the destruction of oil accumulations. The revealed differences should be taken into account when predicting the preferential productivity of the sediment section, as well as when placing exploration work.

Keywords: water area, Caspian Sea, North Caspian, Middle Caspian, South Caspian, formation, reformation, oil, gas, generation, migration, accumulation

For citation: Lobusev A.V., Salakhova L.N., Bochkarev A.V., Antipova Yu.A. Ontogenesis of Hydrocarbons in the Caspian Sea. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):88-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-88-96>

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

Онтогенез углеводородов (УВ) в Каспийском море рассматривается в рамках выполненного районирования территории, в основе которого лежат различные условия формирования УВ в северной, средней и южной частях моря [1].

Северный Каспий (I на рис. 1) расположен к югу от дельты реки Волга, в мелководной части Северного Каспия. Через его акваторию проходит зона сочленения двух разновозрастных платформ: древней Восточно-Европейской и эпигерцинской Скифско-Туранской.

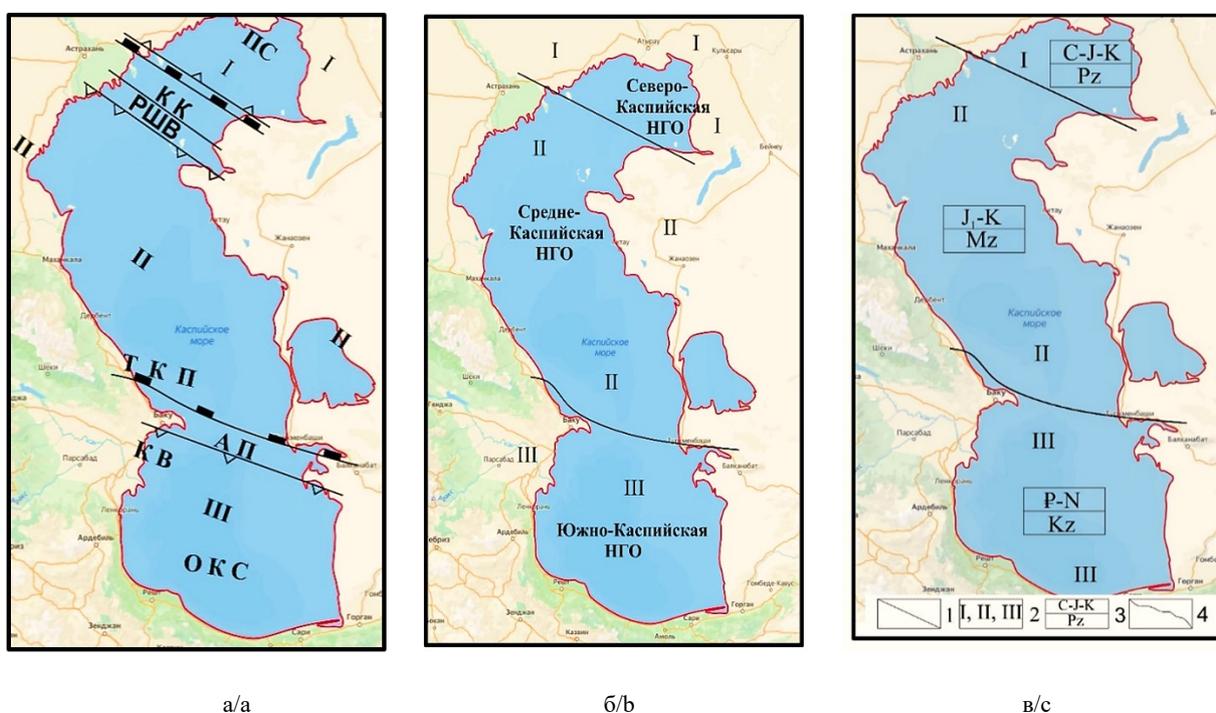
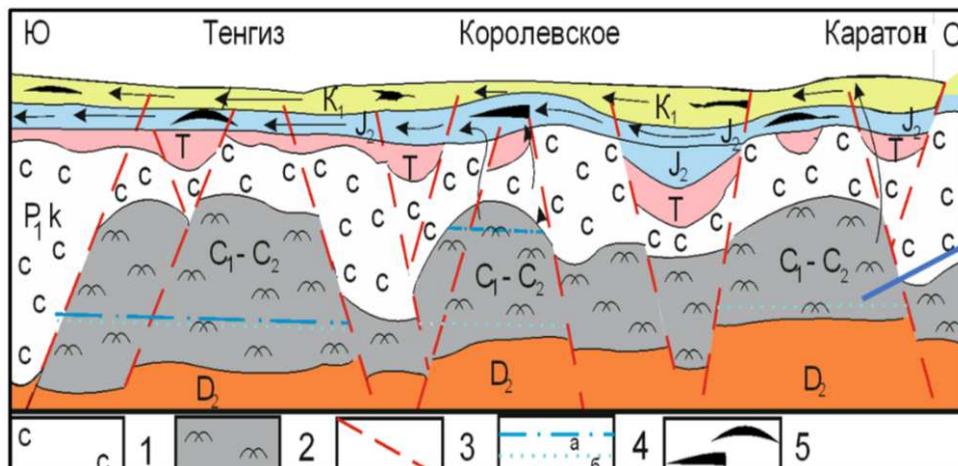
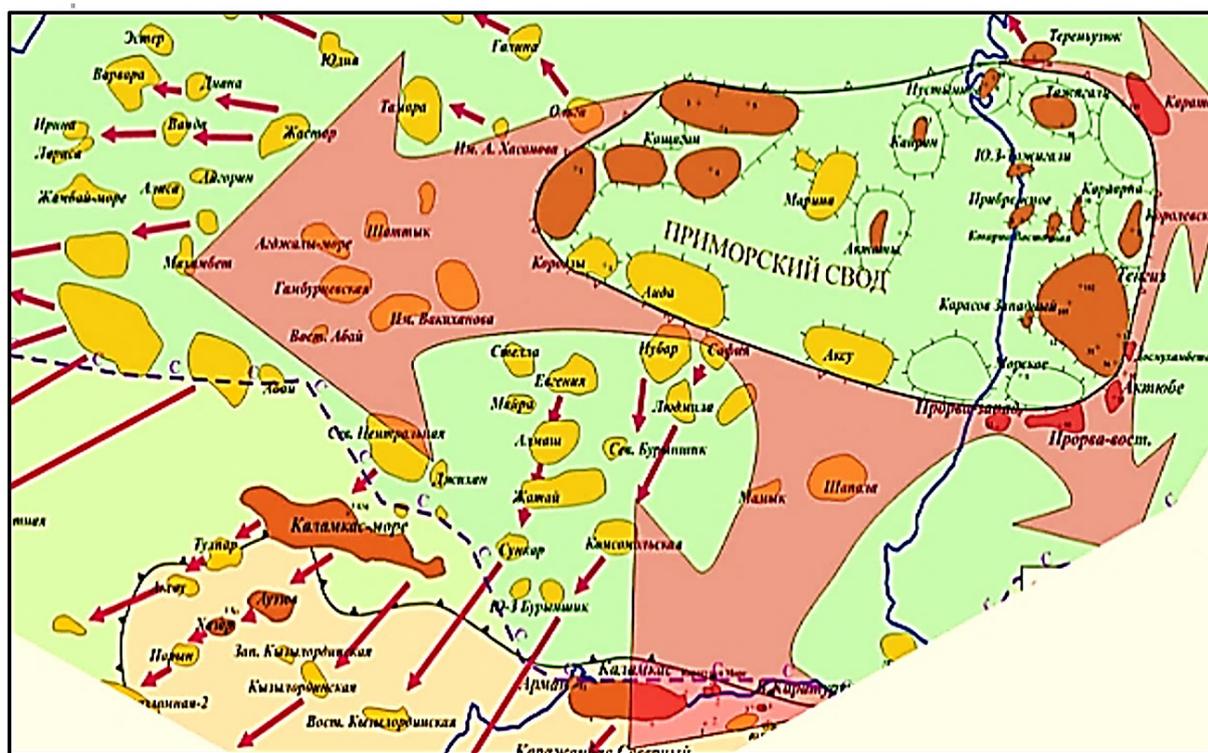


Рис. 1. Схема тектонического районирования акватории Каспийского моря (а): I – Восточно-Европейская (Русская) платформа; II – Скифско-Туранская (эпигерцинская) платформа; III – область кайнозойской (альпийской) складчатости (ОКС); PS – Прикаспийская синеклиза; KK – кряж Карпинского, RSV – Ракушечно-Широтный вал; AP – Апшеронский порог; KV – Куринская впадина; фрагменты нефтегазоносных областей (б); нефтегазогеологическое районирование акватории (в): I – северный Каспий; II – средний Каспий; III – южный Каспий; 3 – в числителе – возраст продуктивных отложений в зоне накопления УВ: C-J-K₁ – каменноугольные – юрские – нижнемеловые; J-K₁ – юрские и нижнемеловые отложения; P-N – палеоген-неогеновые (майкопские) отложения; в знаменателе – материнский (генерационный) комплекс отложений, за счет которых сформировались месторождения: Pz – палеозойский; Mz – мезозойский; Kz – кайнозойский; 4 – линия берега моря / Fig. 1. Scheme of tectonic zoning of the Caspian Sea (a): I - East European (Russian) platform; II - Scythian-Turanian (Epigercine) platform; III - Cenozoic (Alpine) folding area (ACS); PS - Caspian syncline; KK - Karpinsky ridge; RSV - Shell-Latitudinal shaft; AP - Apsheron threshold; KV - Kurinskaya depression; fragments of oil and gas bearing areas (b); oil and gas geological zoning of the water area (c): I - Northern Caspian; II - Middle Caspian; III - Southern Caspian; 3 - numerator - age of productive deposits in the zone of accumulation of hydrocarbons: C-J-K₁ - carboniferous-Jurassic-Lower Cretaceous; J-K₁-Jurassic and Lower Cretaceous deposits; P-N - Paleogene-Neogene (Maikop) deposits; in the denominator - the parent (generation) complex of deposits, due to which deposits were formed: Pz - Paleozoic; Mz - Mesozoic; Kz - Cenozoic; 4 - the line of the seashore

На эту же зону приходится часть южной границы Прикаспийской синеклизы и северного ограничения кряжа Карпинского [2, 3], а также фрагмент Северо-Каспийской нефтегазоносной области. Продуктивными отложениями являются каменноугольные, юрские, меловые, а генерационный комплекс, за счет которого в них формировались нефтяные и газовые месторождения, составляют палеозойские нефтегазоматеринские породы (рис. 2а).



a/a



b/b

Рис. 2. Схема перетока УВ из залежей в палеозойских отложениях в мезозойские коллекторы (а): 1 – соленосные отложения; 2 – органогенные постройки; 3 – разрывные нарушения; 4 – современный водо-нефтяной контакт (ВНК) (а), палеоуровень ВНК (б); 5 – нефтяные залежи в мезозойских отложениях. Схема движения УВ по мезозойским терригенным отложениям (песчаники) после перетока из палеозойских отложений (б) / Fig. 2. Diagram of the flow of hydrocarbons from deposits in Paleozoic sediments to Mesozoic reservoirs (a): 1 - saline deposits; 2 - organogenic structures; 3 - discontinuous faults; 4 - modern VNK (a), paleolevel VNK(b); 5 - oil deposits in Mesozoic sediments. Diagram of the movement of hydrocarbons through Mesozoic terrigenous sediments (sandstones) after the overflow from Paleozoic sediments (b)

Главные объекты связываются с Прикаспийской синеклизой с мощным пермским соленакоплением: Астраханское и Приморское сводовые сооружения [4]. В органогенных девонско-каменноугольных постройках этой части акватории моря выявлены уникальные по запасам месторождения Кашаган, Тенгиз и другие массивные залежи Приморского атоллообразного сводового сооружения. Полностью или частично обводнившиеся постройки были открыты на прибрежной суше и в акватории моря (Каратон, Тажигали, Пустынное, Огайский, Королевское и супергигант Южный) (рис. 2б).

На первом этапе формирования залежей УВ в органогенные постройки поступала нефть, на втором этапе (включая современный) природные газы: со стороны Прикаспийской впадины – углеводородные газы с низким содержанием кислых компонентов (10...13%), тогда как со стороны кряжа Карпинского и южного склона Приморского свода – кислые газы без УВ [4, 5]. В итоге в органогенных постройках формировалась сложная нефтегазоконденсатная смесь с высокими концентрациями кислых компонентов (до 40...50% H_2S и CO_2), высокими значениями газосодержания (514,5...585,9 м³/т) и внутрислоевого давления (свыше 1100 атмосфер). Нефть палеозойского возраста выделилась из органического вещества (ОВ), степень преобразованности которого соответствовала $R^{°}_{вт} = 0,95...1,09$ (градации катагенеза МК₁...МК₃) [3].

Выявленные в юрско-меловых отложениях нефтяные залежи сформировались за счет полностью или частично разрушенных уникальных скоплений нефти в подсолевых каменноугольных рифогенных постройках (рис. 2а).

Малые толщины, современные и палеоглубины залегания подошвы мезозойско-кайнозойских отложений в этой части моря свидетельствуют о том, что они не вышли из градаций протокатагенеза и не вошли в главную зону нефтеобразования [3].

В результате стремительного внедрения (глубина 4...6 км) из карбонатных каркасных образований по зонам дробления разрывных нарушений палеозойская нефть с начальной плотностью 0,800...0,810 г/см³ (современная плотность нефти месторождения Тенгиз) оказалась в юрско-меловых терригенных (песчаники, алевролиты) пластах на глубине 0,25...2,5 км (рис. 2б). При этом по пути движения по терригенным юрско-меловым пластам сероводород в составе прорвавшегося растворенного газа палеозойского возраста редуцировался в реакциях с веществами в породе, содержащих закисное и окисное железо (на порядок в большем количестве, чем в карбонатных породах), с образованием пирита и марказита [6, 7].

Дальнейшая история пребывания палеозойской нефти в мезозойских отложениях в акватории северного Каспия и на прилегающей суше (обособившаяся Бузачинско-Прорвинская группа нефтяных месторождений) связана с длительным периодом биodeградации, лишившей ее легких фракций (низкое содержание n-алканов). Не получая дополнительного питания (потеря связи с зоной генерации), остаточная тяжелая нефть (плотность более 0,900 кг/м³) в процессе бактериального окисления постепенно теряла полезные свойства. Отсюда высоким содержанием смол и асфальтенов (19...40%), парафинов (более 3%), серы (более 2%) и экстрагированного незрелого ОВ (бурые угли с $R^{°}_{вт}$ менее 0,5%) [6, 7].

Средний Каспий (II на рис. 1). Северное ограничение кряжа Карпинского служит северной границей среднего Каспия [3]. От этой границы до Апшеронского порога средний Каспий является частью Скифско-Туранской платформы с мезозойским (в основном – ниже-среднеюрским) материнским комплексом (рис. 1). Сушу и море на уровне среднего Каспия объединяют одинаковые условия формирования месторождений в юрских и меловых отложениях за счет УВ, генерированных ниже-среднеюрскими отложениями Терско-Каспийского прогиба – главного очага генерации УВ в предальпийских прогибах и впадинах Северного Кавказа и Средней Азии, включая средний Каспий [7, 8]. В пределах среднего Каспия залежи УВ формировались в юрских и меловых отложениях за счет их генерации в материнских отложениях Терско-Каспийского прогиба, который характеризуются большими суммарными толщинами, значительной глубиной их погружения и высоким содержанием в них ОВ и битумоидов (рис. 3).

После формирования верхнемеловых отложений юрско-меловой генерационно-аккумуляционный комплекс пород среднего Каспия оказался первоначально в главной зоне нефтеобразования, затем в главной зоне газообразования (по настоящее время), что отразилось на особенностях непрерывного формирования и переформирования залежей УВ (рис. 3). Последовательная смена условий нефтегазообразования в ниже-среднеюрских отложениях Терско-Каспийского прогиба послужила основанием для разделения суммарного эффекта каждой части этого процесса на два

основных укрупненных этапа формирования и размещения залежей УВ по всей юрско-меловой генерационно-аккумуляционной системе: формирование нефтяных и нефтегазовых залежей (нефтегазовая история) и формирование и переформирование газовых и газоконденсатных залежей (газоконденсатная история) [9].

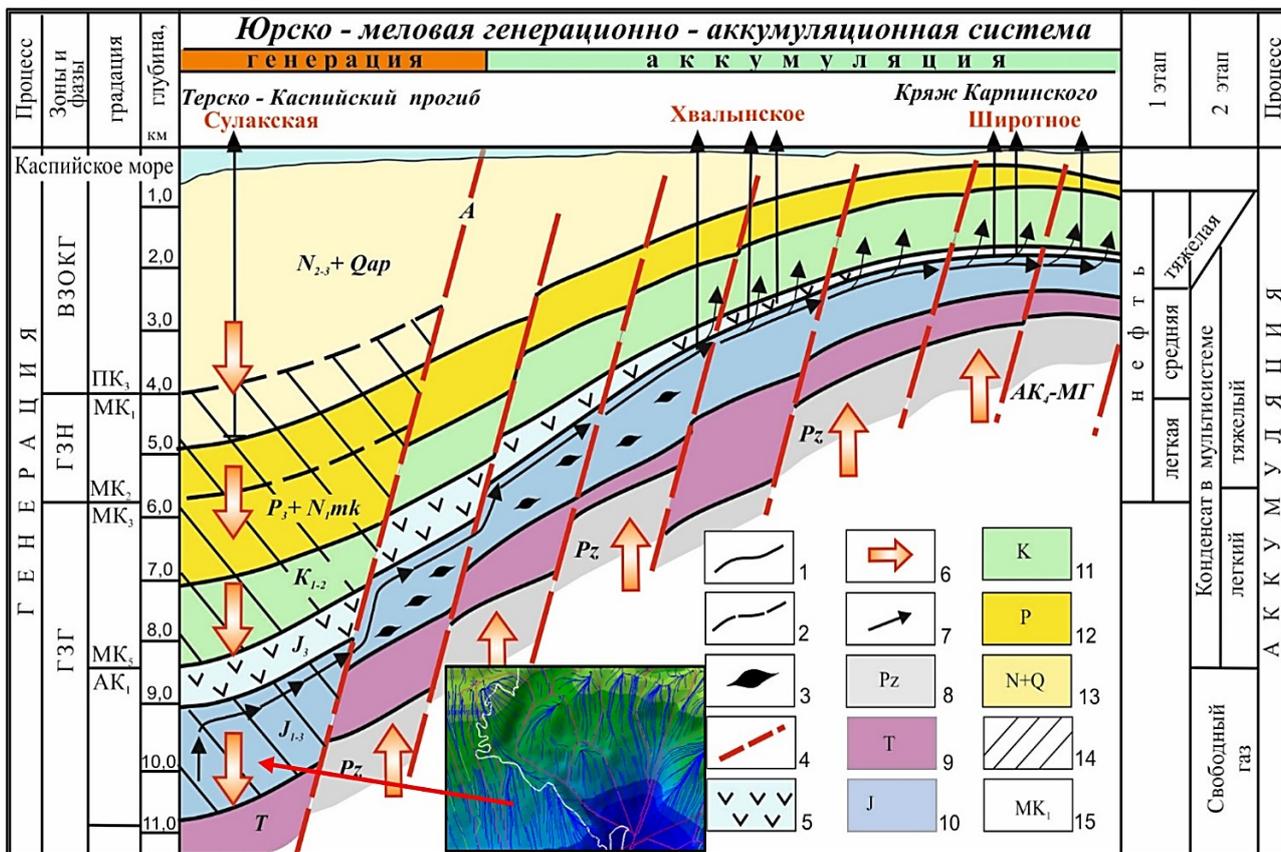


Рис. 3. Схема формирования, переформирования и разрушения залежей УВ на втором (газоконденсатном) этапе среднего Каспия [6]: 1 – стратиграфические границы; 2 – изолинии граничных значений градаций катагенеза; 3 – реликтовая (деградированная) нефть; 4 – разрывные нарушения (сбросы, пороговый уступ – А); 5 – сульфатно-ангидритовая толща; 6 – направление важнейших тектонических движений (погружение, подъем); 7 – направление миграционных струйных потоков углеводородных газов (2-й этап); отложения: 8 – палеозойского фундамента; 9 – триасовые; 10 – юрские; 11 – меловые; 12 – палеогеновые; 13 – неоген-четвертичные; 14 – зона генерации; 15 – градации катагенеза; ГЗГ – главная зона газообразования; ГЗН – главная зона нефтеобразования; ВЗОНГ – верхняя зона образования неуглеводородных газов; МГ – метазенез / Fig. 3. Scheme of formation, reformation and destruction of hydrocarbon deposits at the second (gas condensate) stage of the Middle Caspian Sea (according to V.A. Bochkarev) [6]: 1 - stratigraphic boundaries; 2 - isolines of boundary values of catagenesis gradations; 3 - relict (degraded) oil; 4 - discontinuous disturbances (discharges, threshold ledge - A); 5 - sulfate-anhydrite strata; 6 - direction of the most important tectonic movements (immersion, uplift); 7 - direction of migratory jet streams of hydrocarbons gases (stage 2); deposits: 8 - Paleozoic basement; 9 - Triassic; 10 - Jurassic; 11 - Cretaceous; 12 - Paleogene; 13 - Neogene-Quaternary; 14 - generation zone; 15 - gradations of catagenesis; GZG - main zone of gas formation; GZN - main zone of oil formation; VZONG - upper zone of formation of non-hydrocarbon gases; MG - metagenesis

Первый этап отражает формирование на многочисленных путях миграции в широком стратиграфическом диапазоне юрских отложений преимущественно нефтяных и нефтегазовых месторождений. Отсеченные от миграционных путей на втором этапе нефтяные залежи первого этапа сохранились в нижней части юрских отложений (реликт или сохранившийся до наших дней остаток). Потеряв связь с современными зонами генерации УВ, физико-химические свойства такой нефти приближаются к кондициям трудноизвлекаемой нефти с низким коэффициентом извлече-

ния, как это имеет место в нефтяных скоплениях юрских отложений в пределах Хазри-Титонского и Хвалынско-Сарматского мегавалов [7]. Данные увядающие залежи отражают подэтап разрушения скоплений УВ, сформировавшихся на первом этапе.

На втором (газоконденсатном) этапе в зоне генерации Терско-Каспийского прогиба юрские материнские отложения вошли и пребывают в главной зоне газообразования ($МК_3^2 \dots АК_1^1$) и зоне метанообразования ($АК_1^2 \dots АК_4^1$) [9, 10]. Как показано на рис. 3, из очага газогенерации растекаются многочисленные струйные потоки по разнопротяженным путям миграции УВ сначала по юрским, потом по нижнемеловым отложениям, к которым приурочены уже открытые и еще не выявленные месторождения. Струйные газоконденсатные потоки уже в зоне генерации перетекают по сбросо-уступу (А) в верхнеюрские отложения и двигаются под подошвой верхнеюрской соленосной покрывки по мере воздымания пород в сторону кряжа Карпинского. Встречая на своем пути под кромкой соленосных образований нефтяные скопления первого этапа их формирования, струйные потоки УВ газов по мере продвижения в пределах встреченных ловушек, в разной степени растворили в себе нефть ранней генерации в различных соотношениях, создавая газоконденсатные растворы (мультисистемы). Происходит таким образом переформирование нефтяных скоплений в газоконденсатные залежи (Хвалынское, 170 км, Хазри, им. Ю. Кувыкина, Р. Маганова). Перечисленные месторождения выявлены на современном отрезке второго этапа формирования и переформирования [11], что нашло отражение на рис. 3.

В результате на втором этапе на транзитных путях миграции доминируют углеводородные газы, которые заполняют все доступные ловушки мегавалов: Хазри-Титонского (месторождения Хазри, им. Р. Маганова), Хвалынско-Сарматского (месторождения Хвалынское, 170 км, им. Ю. Кувыкина), Ракушечно-Широтного (месторождения имени Ю. Корчагина, В. Филановского, В. Грайфера и др.). Движение УВ между зонами генерации и накопления УВ обеспечивали перепад пластовых давлений (более 50 МПа) и разница по глубине залегания продуктивных пород (более 2600 м). На втором этапе интенсивный массообмен и фазовые изменения становятся ключевыми в формировании современной газовой среды в верхнеюрско-нижнемеловых отложениях среднего Каспия.

Из всего многообразия тектонических элементов выделим кряж Карпинского в связи с тем, что в пределах его южной части (Ракушечно-Широтный мегавал) сосредоточены основные запасы нефти и газа среднего Каспия, с которых началось широкое освоение акватории моря в российском секторе, включая детальную разведку и разработку месторождений им. Ю. Корчагина и им. В. Филановского [2, 4]. В зоне аккумуляции УВ на примере указанного мегавала было установлено, что в нефтегазовые залежи происходит непрерывное внедрение газоконденсата сначала в нефтяные оторочки залежей в юрских отложениях, а затем в нефтяные оторочки залежей в неокомских и аптских отложениях нижнего мела с поступательным изменением состава и свойств УВ в залежах (за счет процессов смешения и растворения) пришедшими из зоны генерации газообразными УВ. Составы и свойства нефти и газа в залежах юры, апта и неокома установленных месторождений свидетельствуют о том, что они образовались из одного и того же источника (указанный выше юрский очаг генерации на рис. 3) [11].

Южный Каспий приходится на объекты альпийских прогибов, впадин и поднятий (III на рис. 1), приуроченных к Южно-Каспийской нефтегазоносной области (Куринская впадина, Дагестанский выступ, Апшеронский порог и др.). Апшеронский порог – поднятие в рельефе дна моря, связанное с Апшероно-Прибалханской зоной поднятий и отделяющее средний Каспий от южного. По северному склону порога эпигерцинская платформа среднего Каспия граничит с альпийской складчатой областью южного Каспия. Куринская альпийская впадина включает в разрезе отложений основной материнский комплекс – майкопскую глинистую толщу (рис. 4, 5).

Южнокаспийские депрессии заполнены мощной толщей неметаморфизованных кайнозойских осадков, сложного строения, с крутым западным и пологим восточным склоном и характеризуются проявлением грязевого вулканизма. Глубина моря не превышает 1000 м. Толщина осадочного чехла достигает в депрессиях 25 км. На плиоцен-четвертичные отложения приходится 10 км. Ниже залегают глинистые миоценовые и олигоценные отложения, с которыми связаны корни грязевых вулканов [12].

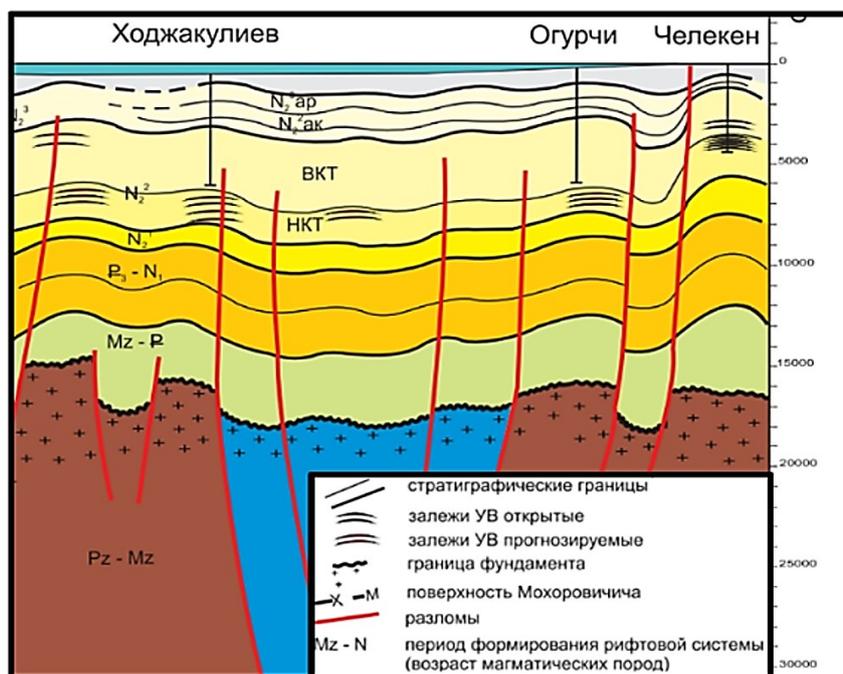


Рис. 4. Геологический разрез отложений Южно-Каспийской впадины [12, 13] / Fig. 4. Geological section of sediments of the South Caspian depression [12, 13]

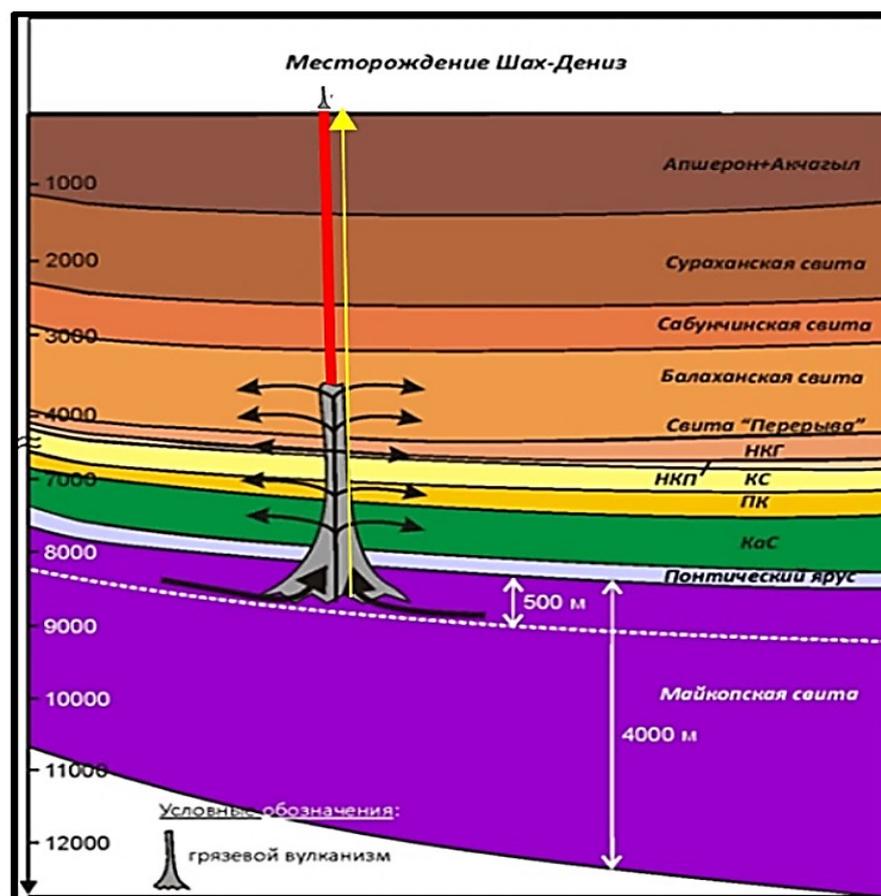


Рис. 5. Часть разреза майкопской свиты в зоне в генерации УВ и пути их вертикальной миграции с формированием промежуточных скоплений в пластах-коллекторах и грязевого вулкана (смесь глины, нефти, воды и газа) на поверхности Земли [14] / Fig. 5. Part of the section of the Maikop formation in the zone of HC generation and the ways of their vertical migration with the formation of intermediate accumulations in reservoir formations and a mud volcano (a mixture of clay, oil, water and gas) on the Earth's surface [14]

Прорыв УВ из залежей в глинистых образованиях майкопской серии осадков, пребывающих в закрытых системах с аномально высоким пластовым давлением, – рядовое явление в природе, именуемое процессом эмиграции новообразованных УВ из слабопроницаемой нефтегазоматеринской сланцевой толщи во вмещающие породные комплексы с высокими фильтрационно-емкостными свойствами. Переток УВ из этой системы по ослабленным участкам зон дробления пород разрывных нарушений приводит к формированию нефтяных и газовых скоплений в высокопроницаемых песчаниках на пути вертикальной миграции. По мере заполнения последних или при отсутствии коллекторов в разрезе прорываемых отложений разрывное нарушение выводит флюиды из зоны генерации на поверхность Земли в виде грязевых вулканов. Только установленных на суше и под водой Каспийского моря грязевых вулканов насчитывается более 200 (рис. 5) [13, 14].

Таким образом, в акватории Каспийского моря по генетическим и другим признакам выделяются северная, центральная и южная части. В результате обобщения представлений о геологическом строении недр и нефтегазоносности каждой выделенной части акватории Каспийского моря выявлены различия в особенностях формирования, переформирования и разрушения залежей УВ в палеозойских (северный Каспий), мезозойских (средний Каспий) и кайнозойских (южный Каспий) отложениях, что следует учитывать при прогнозе нефтегазоносности отдельных участков территории и преимущественной продуктивности разреза отложений.

Список источников

1. Сианисян Э.С., Бочкарев А.В., Бочкарев В.А., Сианисян С.Э. Развитие представлений о возобновляемости углеводородов в разрабатываемых залежах и пути рациональной добычи нефти и газа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 2. С. 90–94. EDN: ХТССУР. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2018-2-90-94>
2. Бочкарев А.В., Бочкарев В.А. Рубеж перспективности палеозойских отложений на юге России // ТЭК России – основа процветания страны: сб. докл. СПб.: ВНИГРИ, 2004. С. 178–184.
3. Бродский А.Я., Капустин И.Н. Строение и нефтегазоносность зоны сочленения Прикаспийской впадины и кряжа Карпинского // Нефтегазовая геология и геофизика. 1986. № 6. С. 5–8.
4. Салахова Л.Н. Строение южной части кряжа Карпинского в пределах российского сектора Каспийского моря (Ракушечно-Широтный мегавал) // Тр. РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. 2024. № 3 (316). С. 37–45. EDN: NSZHBV.
5. Бочкарев А.В., Делия С.В., Карпов П.А., Самоиленко Г.Н., Степанов А.Н. Опыт предлицензионной оценки перспектив нефтегазоносности // Геология нефти и газа. 2001. № 2. С. 7–12. EDN: АЕКJTF.
6. Лобусев М.А., Лобусев А.В., Бочкарев В.А., Бочкарев А.В. Залежи Северного Каспия. Природа углеводородных и неуглеводородных компонентов в продукции залежей в палеозойских отложениях Северного Каспия // Neftegaz.RU. 2018. № 11. С. 88–93. EDN: YOKXLN.
7. Бочкарев В.А., Остроухов С.Б., Алексеев А.Г. Генезис тяжелых нефтей Среднего Каспия // Нефтепромышленное дело. 2010. № 1. С. 4–7. EDN: KZXNJT.
8. Касьянова Н.А. Современная геодинамика и ее влияние на нефтегазоносность Кавказско-Скифского региона. М.: Геоинформмарк, 1995. 55 с.
9. Бочкарев В.А., Остроухов С.Б. Концепция поэтапного формирования и размещения залежей углеводородов в акватории Среднего Каспия // Нефтепромышленное дело. 2011. № 12. С. 5–10. EDN: ONDLLH.
10. Неручев С.Г., Парпарова М. Катагенез и нефтегазоносность. Л.: Недра, 1981. 240 с.
11. Дорофеев Н.В., Бочкарев А.В., Остроухов С.Б., Талдыкин С.А., Калугин А.А. Формирование газоконденсатных залежей Среднего Каспия // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2014. № 9. С. 4–13. EDN: SNGHEV.
12. Алиханов Э.Н. Нефтяные и газовые месторождения Каспийского моря. Баку: Азернешр, 1964. 383 с.
13. Алиев А.И. Грязевые вулканы – очаги периодической газогидродинамической разгрузки быстропгружающихся осадочных бассейнов и важные критерии прогноза газоносности больших глубин // Геология нефти и газа. 2006. № 5. С. 26–32.
14. Бочкарев В.А. Концепция освоения сланцевых углеводородов. М.: ДПК Пресс, 2021. 332 с.

References

1. Sianisyan E.S., Bochkarev A.V., Bochkarev V.A., Sianisyan E.S. The development of ideas about the renewable nature of hydrocarbons in the developed deposits and the ways of rational oil and gas production. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2018;(2):90-94. (In Russ.). EDN: ХТССУР. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2018-2-90-94>

2. Bochkarev A.V., Bochkarev V.A. The frontier of the prospects of Paleozoic deposits in the south of Russia. *Fuel and energy complex of Russia - the basis of the country's prosperity*. Collection of reports. St. Petersburg: All-Russian Petroleum Scientific Research Geological Exploration Institute; 2004:178-184. (In Russ.).
3. Brodsky A.Ya., Kapustin I.N. Structure and oil and gas potential of the junction zone of the Caspian depression and the Karpinsky ridge. *Oil and Gas Geology and Geophysics*. 1986;(6):5-8. (In Russ.).
4. Salakhova L.N. The structure of the southern part of the Karpinsky ridge within the Russian sector of the Caspian Sea (Shell-Latitudinal megawall). *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2024;(3):37-45. (In Russ.). EDN: NSZHBV.
5. Bochkarev A.V., Delia S.V., P.A. Karpov P.A., Samoilenko G.N., Stepanov A.N. The experience of pre-licensing assessment of the prospects of oil and gas potential. *Russian Oil And Gas Geology*. 2001;(2):7-12. (In Russ.). EDN: AEKJTF.
6. Lobusev M.A., Lobusev A.V., Bochkarev V.A., Bochkarev A.V. Deposits of the Northern Caspian Sea. The nature of hydrocarbon and non-hydrocarbon components in the production of deposits in the Paleozoic sediments of the Northern Caspian. *Neftegaz.RU*. 2018;(11):88-93. (In Russ.). EDN: YOKXLN.
7. Bochkarev V.A., Ostroukhov S.B., Alekseev A.G. Genesis of heavy oils of the Middle Caspian Sea. *Oilfield Engineering*. 2010;(1):4-7. (In Russ.). EDN: KZXNJT.
8. Kasyanova N.A. *Modern geodynamics and its influence on the oil and gas potential of the Caucasian-Scythian region*. Moscow: Geoinformmark; 1995. 55 p. (In Russ.).
9. Bochkarev V.A. Ostroukhov S.B. The concept of phased formation and placement of hydrocarbon deposits in the waters of the Middle Caspian Sea. *Oilfield Engineering*. 2011;(12):5-10. (In Russ.). EDN: ONDLLH.
10. Neruchev S.G., Parparova M. *Katagenesis and oil and gas potential*. Leningrad: Subsoil; 1981. 240 p. (In Russ.).
11. Dorofeev N.V., Bochkarev A.V., Ostroukhov S.B., Taldykin S. A., Kalugin A.A. Formation of gas condensate deposits of the Middle Caspian Sea. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2014;(9):4-13. (In Russ.). EDN: SNGHEV.
12. Alikhanov E.N. *Oil and gas fields of the Caspian Sea*. Baku: Azernashr; 1964. 383 p. (In Russ.).
13. Aliyev A.I. Mud volcanoes - foci of periodic gas-hydrodynamic unloading of rapidly submerging sedimentary basins and important criteria for predicting the gas content of great depths. *Russian Oil And Gas Geology*. 2006;(5):26-32. (In Russ.).
14. Bochkarev V.A. *The concept of the development of shale hydrocarbons*. Moscow: DPK Press; 2021. 332 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.В. Лобусев – доктор геолого-минералогических наук, профессор, проректор по исследованиям и развитию технологий ресурсной базы ТЭК, заведующий кафедрой общей и нефтегазопромысловой геологии.

Л.Н. Салахова – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей и нефтегазопромысловой геологии.

В.А. Бочкарев – кандидат геолого-минералогических наук, директор по геологоразведке и разработке.

Ю.А. Антипова – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель, доцент кафедры общей и нефтегазопромысловой геологии.

Information about the authors

A.V. Lobusev – Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Professor, Vice-Rector for Research and Development of Technologies of the Fuel and Energy Complex Resource Base, Head of the Department of General and Oil and Gas Field Geology.

L.N. Salakhova – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Department of General and Oil and Gas Field Geology.

V.A. Bochkarev – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Director of Exploration and Development.

Yu.A. Antipova – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Senior Lecturer, Associate Professor of the Department of General and Oil and Gas Field Geology.

*Статья поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 07.11.2024; approved after reviewing 12.12.2024; accepted for publication 17.02.2025.*

Научная статья

УДК 551.594

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-97-103>

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДНОГО ЭФФЕКТА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО РЕЛЬЕФА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Дмитрий Владимирович Тимошенко

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

dmitrytim@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0444-2807>

Аннотация. Решена задача нахождения пространственного распределения электрического поля в нетурбулентном приземном слое при наличии неоднородности земной поверхности (электрод) в форме эллипсоида. Показано, что она сводится к внешней задаче Дирихле для уравнения Лапласа относительно потенциала электрического поля в эллипсоиде. Установлена зависимость распределения напряженности электрического поля от соотношения размеров неоднородностей на земной поверхности. Доказана преемственность перехода от задачи для плоского электрода к задачам для электрода со сферической и эллипсоидальной неоднородностью. Полученные результаты могут быть использованы в ходе интерпретации данных атмосферно-электрических наблюдений, проводимых в условиях неоднородного рельефа земной поверхности, в частности при оценке искажений измеряемого электрического поля самими измерителями и конструкциями. Предложенный подход к построению распределения напряженности электрического поля отражает геометрические характеристики приземного слоя и не зависит от наличия дополнительных локальных факторов (влияние турбулентного или конвективного переноса ионов), поэтому носит универсальный характер относительно типа стратификации приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: электродный эффект, электрическое поле, приземный слой, эллипсоид

Для цитирования: Тимошенко Д.В. Особенности электродного эффекта в приземном слое атмосферы в условиях неоднородного рельефа земной поверхности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 97–103. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-97-103>

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

Original article

FEATURES OF THE ELECTRODE EFFECT IN THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE UNDER CONDITIONS OF NON-UNIFORM RELIEF OF THE EARTH'S SURFACE

Dmitry V. Timoshenko

Southern Federal University, Taganrog, Russia

dmitrytim@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0444-2807>

Abstract. The problem of finding the spatial distribution of the electric field in the classical electrode layer in the presence of heterogeneity of the Earth's surface (electrode) in the shape of an ellipsoid has been solved.

© Тимошенко Д.В., 2025

It is shown that this problem reduces to the external Dirichlet problem for the Laplace equation with respect to the electric field potential in an ellipsoid. The dependence of the electric field strength distribution on the ratio of the sizes of inhomogeneities on the Earth's surface has been established. The continuity of the transition from the problem for a flat electrode to the problems for an electrode with spherical and ellipsoidal inhomogeneity is shown. The results obtained can be used in the interpretation of data from atmospheric-electrical observations conducted in conditions of heterogeneous relief of the Earth's surface, in particular, when evaluating distortions of the measured electric field by the meters and structures themselves. The proposed approach to the construction of the electric field strength distribution reflects the geometric characteristics of the surface layer and does not depend on the presence of additional local factors (such as the influence of turbulent or convective ion transport), therefore it is universal in relation to the type of stratification of the surface layer of the atmosphere.

Keywords: electrode effect, electric field, surface layer, ellipsoid

For citation: Timoshenko D.V. Features of the Electrode Effect in the Surface Layer of the Atmosphere under Conditions of Non-Uniform Relief of the Earth's Surface. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):97-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-97-103>

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

Введение

Мониторинг электрического поля атмосферы проводится с помощью приборов, расположенных вблизи поверхности Земли и установленных различными способами на некоторой высоте [1]. Земная поверхность во внешнем электрическом поле является отрицательным электродом, а совокупность сложной геометрии и метеоявлений описывается теорией электродного эффекта в атмосфере [2].

Для сравнительного анализа данные атмосферно-электрических наблюдений приводятся к условиям плоской поверхности с помощью коэффициента редукции, учитывающего геометрические искажения электрического поля [3, 4]. Очевидно, что геометрия электрода играет существенную роль при определении коэффициента редукции [3, 4]. Отметим, что важность данных исследований определяется не только задачами атмосферного электричества, но и вопросами функционирования различных приборов, чувствительных к параметрам приземной атмосферы, например к телескопам. В частности, купол телескопа создает существенную геометрическую неоднородность электродного приземного слоя, искажающую распределение электрического поля и меняющую оптические свойства приземной атмосферы [5].

Состояние проблемы

Впервые задача о распределении напряженности электрического поля между заряженными металлическими пластинами, помещенными в ионизированную газовую среду, в одномерной постановке рассмотрена в работе [6]. Модель, получившая впоследствии название классического электродного эффекта, описывалась следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \pm \frac{d}{dz}(b_{1,2}n_{1,2}E) &= q - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{dE}{dz} &= \frac{e}{\epsilon_0}(n_1 - n_2), \\ j &= e(b_1 n_1 + b_2 n_2)E, \end{aligned} \quad (1)$$

где $n_{1,2}$ – концентрация положительных и отрицательных легких ионов (аэроионов); b_1, b_2 – их подвижность; E – напряженность электрического поля; j – плотность электрического тока; q – скорость (интенсивность) ионообразования; α – коэффициент рекомбинации; e – элементарный заряд; z – ось координат, перпендикулярная пластинам.

Решение системы уравнений (1) было получено в виде соотношения $\frac{E_\infty^2}{E_0^2} = \beta^{\frac{\beta}{1-\beta}}$, $\beta = \frac{8\pi eb}{\alpha}$,

где E_0 – значение напряженности электрического поля на поверхности электрода, E_∞ – на расстоянии l от него. При $b = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, $e = 1,14 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ значение электродного эффекта $\frac{E_0}{E_\infty} \approx 2,5$.

На некотором расстоянии ℓ от поверхности электрода E становится постоянным, концентрации n_1 и n_2 – одинаковыми, поэтому поток ионов в этой точке в единицу времени равен $\frac{j}{2e}$. С другой стороны, число ионов в единицу времени, проходящих через единичную площадь в этой точке, не может превышать значения $q \cdot \ell$, т.е. $q\ell > \frac{j}{2e}$. Отсюда получаем оценку значения величины $\ell > \frac{j}{2eq}$, так называемую толщину электродного слоя.

Рассмотренная модель электродного эффекта относится к электроду плоской формы, т.е. она применима к эксперименту, проводимому в равнинных условиях.

Особый интерес представляют работы, изучающие электродный эффект вблизи поверхностей проводников произвольной формы. Математическая задача при этом существенно усложняется, так как уравнения становятся двумерными (трехмерные – в особо сложных случаях), поэтому приходится использовать дополнительные упрощения исходной задачи.

В [7] рассмотрена задача о распределении электрических характеристик вблизи тонкой стенки (стержень). В предположении $n_1 = \text{const}$ получено распределение n_2/n_1 , в [8] получены распределения E и $n_{1,2}$ вблизи шарообразного электрода при условии $b_1 = b_2 = b$ и $q = \text{const}$:

$$n_{1,2} = \frac{\varphi_0 \cdot (2\beta)^{\beta/(1-2\beta)}}{\varphi} \pm \left[\frac{\varphi_0^{\frac{2\beta-1}{\beta}} \cdot \varphi^{\frac{1}{\beta}} - \varphi^2}{1-2\beta} + \varphi_0^2 \cdot (2\beta)^{\frac{2\beta}{1-2\beta}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \beta = \frac{e \cdot b}{\varepsilon_0 \alpha}, \quad \varphi = Er^2, \quad \varphi_0 = E_0 r_0^2,$$

для $\beta = 1$:

$$2 \frac{r^2}{r_0^2} \cdot E - 2 + \ln \left(2 \cdot \frac{r^2}{r_0^2} \cdot E - 1 \right) = -\frac{4}{3} (r^3 - r_0^3) \cdot \frac{1}{r_0^2}. \quad (2)$$

где r_0 – радиус шара; r – расстояние от центра шара.

В [3, 4] найдено пространственное распределение напряженности электрического поля для электрода со сферической неоднородностью на плоской поверхности.

Целью настоящей работы является нахождение пространственного распределения электрического поля в приземном электродном слое с неоднородностью эллипсоидального типа.

Распределение электрического поля в приземном электродном слое с эллипсоидальной неоднородностью

В общем случае для электрода произвольной формы пространственное распределение напряженности электрического поля в приземном слое может быть определено трехмерной формой системы уравнений (1), имеющей вид [2]

$$\pm \text{div} (b_{1,2} n_{1,2} \mathbf{E}) = q - \alpha n_1 n_2,$$

$$\text{div} \mathbf{E} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2). \quad (3)$$

Система (3) дополняется связью между напряженностью и потенциалом электрического поля:

$$\mathbf{E} = -\text{grad} \varphi. \quad (4)$$

С учетом соотношения (4) систему (3) можно записать относительно функции потенциала электрического поля φ .

Из системы (3), записанной в декартовых координатах, получаем уравнение Лапласа для потенциала электрического поля в приземном слое атмосферы

$$\Delta\varphi = -\frac{\frac{e}{\varepsilon_0}\left(n_1 - \frac{q}{\alpha n_1}\right)}{1 + \frac{eb_1}{\varepsilon_0\alpha}}. \quad (5)$$

Граничные условия для уравнения (5) имеют вид [3]

$$\varphi(x, y, 0) = 0, \quad \varphi(x, y, z_\infty) = \varphi_\infty, \quad (6)$$

где z_∞ соответствует верхней границе электрода.

При выводе уравнения (5) важным является условие $n_1 = \text{const}$, справедливое для классического электродного эффекта [2]. Для сокращения дальнейших записей правую часть уравнения (5) будем обозначать через A .

Рассмотрим задачу о распределении электрического поля для электрода, на поверхности которого находится неоднородность в форме верхней части эллипсоида. Данная неоднородность может моделировать как естественную возвышенность, так и, например, здание или техническое сооружение. В силу симметрии и физического смысла задачи будем рассматривать часть эллипсоида, расположенную в положительном полупространстве относительно оси аппликат (z) и прилегающую к плоской части земной поверхности.

Наличие на земной поверхности неоднородности эллипсоидальной формы означает, что для определения φ в произвольной точке электродного слоя необходимо решить внешнюю задачу Дирихле для уравнения Лапласа (5) с граничными условиями (6) в эллипсоидальной системе координат [9, 10].

Введем систему координат (λ, μ, ν) , описывающую область пространства, ограниченную поверхностью эллипсоида с полуосями a, b, c . Связь между декартовыми и эллипсоидальными координатами определяется соотношениями [10]:

$$x^2 = \frac{(a^2 + \lambda)(a^2 + \mu)(a^2 + \nu)}{(a^2 - c^2)(a^2 - c^2)}, \quad y^2 = \frac{(b^2 + \lambda)(b^2 + \mu)(b^2 + \nu)}{(b^2 - c^2)(b^2 - a^2)}, \quad z^2 = \frac{(c^2 + \lambda)(c^2 + \mu)(c^2 + \nu)}{(c^2 - a^2)(c^2 - b^2)},$$

где $-c^2 \leq \lambda < \infty$, $-b^2 \leq \mu < -c^2$, $-a^2 \leq \nu < -b^2$.

Вводя обозначение $f(k) = (a^2 + k)(b^2 + k)(c^2 + k)$, получим представление для уравнения Лапласа (5) в эллипсоидальных координатах:

$$\frac{4\sqrt{f(\lambda)f(\mu)f(\nu)}}{(\mu - \nu)(\nu - \lambda)(\lambda - \mu)} \left[\frac{\nu - \mu}{\sqrt{f(\mu)f(\nu)}} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\sqrt{f(\lambda)} \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} \right) + \frac{\lambda - \nu}{\sqrt{f(\lambda)f(\nu)}} \frac{\partial}{\partial \mu} \left(\sqrt{f(\mu)} \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} \right) + \frac{\mu - \lambda}{\sqrt{f(\lambda)f(\mu)}} \frac{\partial}{\partial \nu} \left(\sqrt{f(\nu)} \frac{\partial \varphi}{\partial \nu} \right) \right] = -A. \quad (7)$$

Дифференциальный оператор в левой части (7) в случае невырожденного эллипсоида удовлетворяет условиям Штурма – Лиувилля [11], поэтому для решения этого уравнения возможно применение метода Фурье будем искать решение уравнения (7) в виде произведения трех функций, каждая из которых зависит от соответствующей эллипсоидальной координаты [9–11]:

$$\varphi = \Lambda(\lambda)M(\mu)N(\nu). \quad (8)$$

Подстановка соотношения (8) в уравнение (7) приводит к расщеплению спектральной задачи Штурма – Лиувилля для дифференциального оператора в (7) на совокупность трех совпадающих с точностью до обозначений уравнений для каждой из трех функций, входящих в (8). Далее каждое из трех уравнений преобразуется к уравнению Ламе, решением которого является эллипсоидальная функция соответствующего типа [9, 10].

Таким образом, спектральная задача для уравнения (7) определяет полную ортонормированную систему собственных функций, представленную эллипсоидальными функциями Ламе [9–11], а решение искомой задачи можно записать в виде ряда по собственным функциям:

$$\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A \frac{(1 - (-1)^n)(1 - (-1)^k) \operatorname{sh} \sqrt{n^2 + k^2} (x - a) \operatorname{sh} \sqrt{n^2 + k^2} (y - b) \operatorname{sh} \sqrt{n^2 + k^2} (z - c)}{\operatorname{sh} \pi \sqrt{n^2 + k^2}}. \quad (9)$$

Оценка скорости сходимости и точность решения (9) приведены в работе [10].

Переходный случай между неоднородностью в форме эллипсоида и сферы описывается так называемым сфероидом [10, 12] с близкими по величине полуосями (сплюснутая или вытянутая сфера). Сфероид является результатом конформного преобразования Жуковского [12] $\zeta = z + \frac{a^2}{z}$, переводящего эллипсоид с вытянутыми полуосями в тело, близкое к шару ($a \approx b \approx c$) (рис. 1).

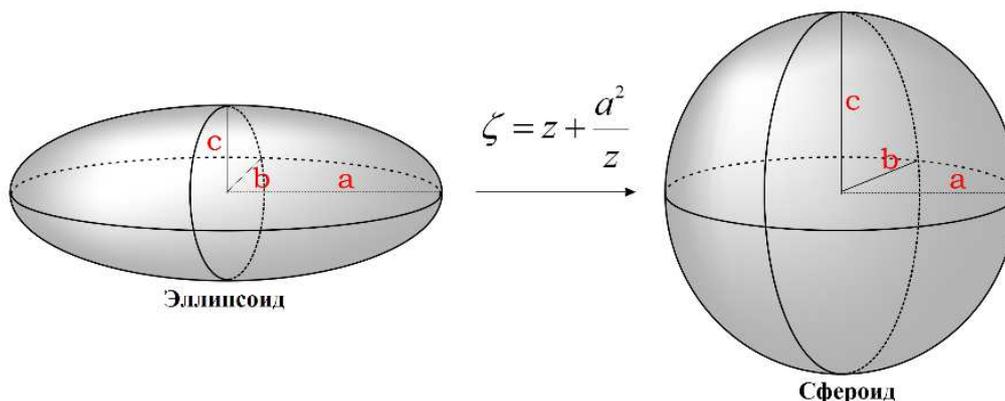


Рис. 1. Переход от эллипсоида к сфероиду / Fig. 1. Transition from an ellipsoid to a spheroid

Данный переход соответствует предельному переходу собственных функций внешней задачи Дирихле для уравнения Лапласа в эллипсоиде (функции Ламе) в соответствующую систему собственных функций уравнения Лапласа в шаре (функции Лежандра). В предельном случае перехода эллипсоида в сферу ($a=b=c=r$) (рис. 2), формула (9) переходит в соответствующее решение внешней задачи Дирихле для уравнения Лапласа в шаре [9, 10]:

$$\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{2A}{\pi n(4 - n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^2 r^{-n} - \frac{2A}{\pi n(4 - n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^2 \right) \cos \varphi + r_0 \sin \varphi \right] \sin n \theta. \quad (10)$$

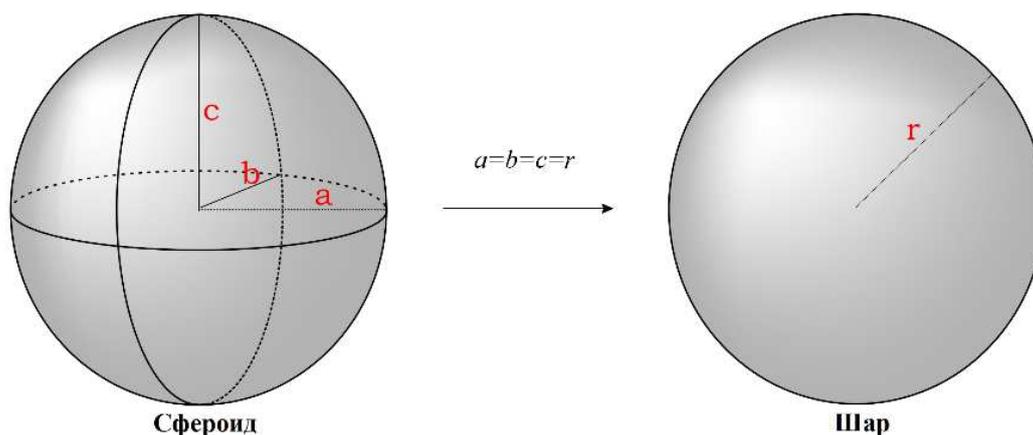


Рис. 2. Переход от сфероида к шару / Fig. 2. Transition from a spheroid to a ball

В [3] в силу горизонтальной однородности электродного слоя внешняя задача Дирихле для уравнения Лапласа в шаре была заменена на внешнюю задачу для уравнения Лапласа в круге. Поэтому результат работы [3] представляет собой частный случай соответствующей трехмерной задачи для уравнения Лапласа, что не уменьшает его значимости в силу приведенных физических соображений:

$$\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1-(-1)^n) r_0^2 r^{-n} - \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1-(-1)^n) r_0^2 \right] \sin n\theta. \quad (11)$$

В свою очередь, существование конформного отображения верхней полуплоскости с круговым вырезом в верхнюю полуплоскость без выреза [12] в совокупности с тем, что дифференциальный оператор уравнения (5) удовлетворяет условиям Штурма – Лиувилля, обеспечивает непрерывный переход решения внешней задачи Дирихле для уравнения Лапласа в круге (электрод со сферической неоднородностью) в решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа в прямоугольнике $0 \leq x \leq a$, $0 \leq y \leq b$ (плоский электрод) [9–11]:

$$\varphi = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k \operatorname{sh}(k\pi x/b) + b_k \operatorname{sh}(k\pi(a-x)/b)}{\operatorname{sh}(k\pi a/b)} \sin k\pi y/b. \quad (12)$$

Полученные соотношения (9)–(12) для распределения потенциала электрического поля в приземном электродном слое с учетом зависимости (5) позволяют исследовать пространственное распределение напряженности электрического поля в условиях неоднородной геометрии земной поверхности.

Заключение

Проведен анализ задачи нахождения пространственного распределения напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы для электрода со сложной геометрией. Показано, что она может быть сведена к внешней задаче Дирихле для уравнения Лапласа относительно потенциала электрического поля в соответствующей области. Получено аналитическое решение внешней задачи Дирихле для уравнения Лапласа в эллипсоиде.

Обоснована возможность непрерывного перехода от задачи плоского электрода к задачам со сферической и эллипсоидальной неоднородностями.

Список источников

1. Афиногенов Л.П., Грушин С.И., Романов Е.В. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 319 с.
2. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
3. Куповых Г.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Тимошенко Д.В., Белоусова О.В. Определение коэффициента редукции атмосферного электрического поля в приземном слое // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2022. № 5. С. 171–181. EDN: NHNTVE. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-5-171-181>
4. Kudrinskaya T.V., Klovo A. G., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Reduction coefficient and electric field near plane electrode with geometric heterogeneity // J. of Physics: IOP Conf. Series. VIII All-Russ Conf. on Atmospheric Electricity. 2020. Vol. 1604, № 1. Art. 012005. 8 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1604/1/012005>
5. Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Доказательство гипотезы Хопфа о структуре турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 1. С. 12–18. EDN: BONCCQ. <https://doi.org/10.15372/AOO20230102>
6. Thomson J.J. Conduction of electricity through gases. Cambridge: University Press, 1903. 566 p.
7. Tuomi T.J. The atmospheric electrode effect over snow // J. Atm. and Terr. Phys. 1982. Vol. 44, iss. 9. P. 737–745. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(82\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90002-2)
8. Калита В.М., Лаптухов А.И., Москаленко А.М. и др. Распределение электрического поля, объемного заряда и концентрации ионов в атмосфере вблизи заряженных тел // Физические процессы в ионосфере и магнитосфере/ М.: Изд-во АН СССР, 1984. С. 110–115.
9. Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж. Н. Курс современного анализа. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1966. Ч. 2. 522 с.
10. Гобсон Е.В. Теория сферических и эллипсоидальных функций. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1952. 476 с.
11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 736 с.
12. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1967. 579 с.

References

1. Afinogenov L. P., Grushin S. I., Romanov E. V. *Equipment for research of the surface layer of the atmosphere*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing; 1977. 319 p. (In Russ.).
2. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Schwartz Ya.M. *Theory of the electrode effect in the atmosphere*. Taganrog: Publishing House of Taganrog University of Technology; 1998. 123 p. (In Russ.).
3. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Belousova O.V. Determination of the reduction coefficient of the atmospheric electric field in the surface layer. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2022;(5):171-181. (In Russ.). EDN: HHNTVE. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-5-171-181>
4. Kudrinskaya T.V., Klovo A. G., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Reduction efficient and electric field near plane electrode with geometric heterogeneity. *Journal of Physics: IOP Conference Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity*. 2020;1604(1):012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1604/1/012005>
5. Nosov V. V., Lukin V. P., Kovadlo P. G., Nosov E. V., Torgaev A.V. Proof of the Hopf hypothesis on the structure of turbulence. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023;36(1):12-18. (In Russ.). EDN: BONCCQ. <https://doi.org/10.15372/AOO20230102>
6. Thomson J.J. *Conduction of electricity through gases*. Cambridge: University Press; 1903. 566 p.
7. Tuomi T.J. The atmospheric electrode effect over snow. *J. Atm. and Terr. Phys.* 1982;44(9):737-745. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(82\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90002-2)
8. Kalita V. M., Laptukhov A. I., Moskalenko A.M. et al. Distribution of the electric field, volume charge and ion concentration in the atmosphere near charged bodies. *Physical processes in the ionosphere and magnetosphere*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1984:110-115. (In Russ.).
9. Whittaker E. T., Watson J. N. *Course of modern analysis*. Moscow: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature; 1966. Part 2. 522 p. (In Russ.).
10. Hobson E. V. *Theory of spherical and ellipsoidal functions*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature; 1952. 476 p. (In Russ.).
11. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. *Equations of mathematical physics*. Moscow: Science; 1972. 736 p. (In Russ.).
12. Lavrentiev M.A., Shabat B.V. *Methods of the theory of functions of a complex variable*. Moscow: Science; 1967. 579 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Д.В. Тимошенко – кандидат физико-математических наук, доцент, Инженерно-технологическая академия.

Information about the author

D.V. Timoshenko – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Academy for Engineering and Technologies.

Статья поступила в редакцию 23.10.2024; одобрена после рецензирования 20.11.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 23.10.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 17.02.2025.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 579.64

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-104-118>

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГИДРОЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БАКТЕРИЙ РОДОВ *VACILLUS* И *RAENIBACILLUS*, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ РИЗОСФЕРЫ ПШЕНИЦЫ ОЗИМОЙ (*TRITICUM AESTIVUM L.*). ЧАСТЬ 2

**Н.Г. Васильченко¹, К.В. Механцева², Ф.Д. Иванов³, Е.П. Пуликова⁴, В.А. Чистяков⁵,
Ал.В. Усатов⁶, А.Б. Брень⁷, Д.В. Рудой⁸**

¹ Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Республика Татарстан, Россия

² Московский физико-технический институт, Москва, Россия

^{2, 3, 4, 5, 6, 7} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

^{5, 7, 8} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ wnikita37@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8829-3861>

² kamilla02@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3403-9395>

³ fivanov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4668-8878>

⁴ epulikova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7716-9302>

⁵ vladimirchi@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2596-0855>

⁶ usatova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-7927>

⁷ brenanzhelika@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7452-6203>

⁸ rudoy.d@gs.donstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

Аннотация. Исследовалось бактериальное сообщество ризосферы озимой пшеницы. Штаммы родов *Raenibacillus* и *Vacillus*, продемонстрировавшие ранее высокую гидролитическую активность, также показали высокую эффективность фосфатмобилизации по сравнению с коммерческим препаратом. Помимо этого, штаммы синтезировали сидерофоры и ауксины, способствующие росту растений. Полученные результаты открывают перспективы для создания новых биопрепаратов на основе выделенных штаммов с потенциалом широкого применения в различных отраслях сельского хозяйства – от растениеводства до кормопроизводства.

Ключевые слова: *Raenibacillus*, *Vacillus*, фосфатмобилизующая активность, сидерофора, индолил-3, уксусная кислота, биопрепараты

Для цитирования: Васильченко Н.Г., Механцева К.В., Иванов Ф.Д., Пуликова Е.П., Чистяков В.А., Усатов Ал.В., Брень А.Б., Рудой Д.В. Биотехнологически перспективные гидролитические свойства бактерий родов *Vacillus* и *Raenibacillus*, выделенных из ризосферы пшеницы озимой (*Triticum aestivum L.*). Часть 2 // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 104–118. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-104-118>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-30006, <https://rscf.ru/project/23-76-30006/>

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

© Васильченко Н.Г., Механцева К.В., Иванов Ф.Д., Пуликова Е.П., Чистяков В.А., Усатов Ал.В., Брень А.Б., Рудой Д.В., 2025

Original article

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF HYDROLYTIC PROPERTIES OF *BACILLUS* AND *PAENIBACILLUS* SPECIES ISOLATED FROM THE WINTER WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) RHIZOSPHERE. PART 2

N.G. Vasilchenko¹, K.V. Mekhantseva², F.D. Ivanov³, E.P. Pulikova⁴, V.A. Chistyakov⁵,
Al.V. Usatov⁶, A.B. Bren⁷, D.V. Rudoy⁸

¹ Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Republic of Tatarstan, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

^{2, 3, 4, 5, 6, 7} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

^{5, 7, 8} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ wnikita37@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8829-3861>

² kamilla02@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3403-9395>

³ fivanov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4668-8878>

⁴ epulikova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7716-9302>

⁵ vladimirchi@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2596-0855>

⁶ usatova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-7927>

⁷ brenanzhelika@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7452-6203>

⁸ rudoy.d@gs.donstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

Abstract. In this study, the rhizosphere bacterial community of winter wheat was investigated. *Paenibacillus* and *Bacillus* strains, previously identified for their significant hydrolytic activity, demonstrated higher phosphate mobilization efficiency compared to a commercial product. Furthermore, these strains were capable of synthesizing siderophores and auxins known to promote plant growth. The obtained results open prospects for the development of novel biopreparations based on the isolated strains, with the potential for wide application in various branches of agriculture, from crop production to fodder production.

Keywords: *Paenibacillus*, *Bacillus*, phosphate-mobilizing activity, siderophores, indolylacetic acid, biopreparations

For citation: Vasilchenko N.G., Mekhantseva K.V., Ivanov F.D., Pulikova E.P., Chistyakov V.A., Usatov Al.V., Bren A.B., Rudoy D.V. Biotechnological Potential of Hydrolytic Properties of *Bacillus* and *Paenibacillus* Species Isolated From the Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Rhizosphere. Part 2. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2025;(1):104-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-104-118>

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-76-30006, <https://rscf.ru/project/23-76-30006/>

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

Введение

Проблема недостаточного обеспечения пищевыми продуктами – одна из наиболее важных в мировой повестке [1], а ликвидация голода является второй целью устойчивого развития ООН [2]. Согласно прогнозам, к 2030 г. до 600 млн чел. будут страдать от хронического недоедания [3]. За последние несколько лет потребность населения в пищевых продуктах выросла и будет продолжать расти. Поэтому биотехнологические разработки для сельскохозяйственной отрасли, обладающие значительным потенциалом повышения эффективности и направленные на снижение затрат, чрезвычайно актуальны и востребованы в растениеводстве, животноводстве, аквакультуре.

Контроль роста сельскохозяйственно важных растений под воздействием абиотического и биотического стрессов – важная и первостепенная задача [4]. Использование минеральных удобрений в сельском хозяйстве – один из основных способов обеспечения растений необходимыми

питательными веществами. Однако высокие затраты на производство и приобретение удобрений, негативное воздействие на окружающую среду ограничивают их применение. Альтернативным перспективным решением является использование биопрепаратов, содержащих ризобактерии, улучшающие рост растений (PGPR). Эти микроорганизмы обитают в зоне корней растений и способствуют их росту и развитию за счет различных механизмов, включая мобилизацию фосфатов, синтез гормонов роста и защиту от патогенов [5].

Использование биопрепаратов с PGPR позволяет сократить потребность в химических удобрениях, что снижает затраты на производство сельскохозяйственных культур. Кроме того, эти бактерии способствуют повышению урожайности и улучшению качества зерна, что особенно важно в условиях глобального роста спроса на продовольственные ресурсы. Бактерии PGPR могут быть использованы не только в агрономии, но и в аквакультуре и ветеринарии благодаря свойствам, способствующим здоровью и продуктивности животных.

Цель данного исследования – оценить фосфатмобилизующую активность, а также способность синтезировать сидерофоры и индол-3-уксусную кислоту (ИУК) у 22 штаммов, выделенных из ризосферы пшеницы озимой (*Triticum aestivum* L.).

Одна из функций PGPR – соллюбилизация неорганических веществ, необходимых растению и находящихся в почве в трудноусвояемой для растения форме. Так происходит с железом – в аэробных условиях при $\text{pH}=7,0$ оно переходит в практически нерастворимый гидроксид $\text{Fe}(\text{OH})_3$, и для получения его клеткой в достаточном количестве необходим переносчик – сидерофор. Сидерофоры выделяются клеткой во внешнюю среду, формируют комплекс с гидроксидом железа и транспортируются обратно в клетку, где происходит отсоединение двухвалентного железа [6, 7]. Многие бактерии, в том числе представители родов *Pseudomonas*, *Streptomyces* и *Paenibacillus* [7], являются активными продуцентами сидерофоров разных групп.

Некоторые PGPR обладают способностью мобилизовать фосфаты с помощью органических кислот, переводя фосфор в доступную для растений форму. Известно, что представители родов *Bacillus* и *Paenibacillus* способны мобилизовать фосфор [8, 9].

Многие PGPR синтезируют вторичные метаболиты, к которым относятся антибиотики, терпеноиды и алкалоиды. Например, представители рода *Bacillus* синтезируют липополипептидные антибиотики – фенгицин, итурин, сурфактин, подавляющие развитие патогенных грибов [10].

Кроме того, PGPR способны синтезировать фитогормоны, которые регулируют наиболее важные процессы жизнедеятельности в организме растений (пролиферация клеток, разрастание и дифференциация тканей) [11, 12]. Ауксин – один из ключевых регуляторов роста растений [13, 14]. Биосинтез и транспорт ауксинов, а также ауксинзависимые сигнальные процессы оказывают влияние на развитие корней в постэмбриональном периоде [15–17]. От них зависит процесс формирования боковых корней и их количество на каждом этапе развития растения [18–21]. Под действием ауксинов клетки корня удлиняются, увеличивается положительный гравитропизм корня [22]. На рост главного корня ИУК оказывает двоякий эффект: стимулирующий – в низкой концентрации, обычно около 10^{-9} – 10^{-12} , и ингибирующий – в более высоких концентрациях [23, 24].

ИУК – основной растительный ауксин [25]. Его предшественником является преимущественно триптофан. Из-за наличия разнообразных интермедиатов триптофанзависимый синтез ИУК у растений может происходить четырьмя путями: индол-3-ацетамидным, индол-3-пировиноградной кислоты, триптамина и индол-3-ацетальдоксима [26], а у бактерий – пятью: индол-3-ацетамидным, индол-3-пировиноградной кислоты, триптамина, индол-3-ацетонитриловым и триптофановым с окислением боковой цепи [27]. У бактерий, стимулирующих рост корней растений, превращение триптофана в ИУК идет чаще всего через индол-3-ПВК в две стадии: на первой происходит отсоединение аминокислотной группы с образованием индол-3-пирувата, на второй – окислительное декарбоксилирование индол-3-пирувата с образованием ИУК, углекислого газа и воды [28, 25]. Донором аминокислотной группы при биосинтезе ИУК могут служить и другие аминокислоты (тирозин, гистидин или фенилаланин), но триптофан считается наилучшим среди протеиногенных аминокислот (исключая глутамин) [29]. Фитопатогенные бактерии, напротив, используют индолацетамидный путь [30]. Большинство бактерий, обитающих на корнях растений, синтезируют ИУК, которая является аналогом экзогенной ИУК, способствует росту корней, укреплению корневой системы и повышает эффективность всасывания воды и питательных веществ.

Материалы и методы

Получение штаммов бактерий. Для исследования были использованы штаммы бактерий, изолированные из почвы с глубины 0–10 см в ризосферной зоне озимой пшеницы (*Triticum aestivum*) на полях Юга России, Воронежской и Курской областей. Восемь штаммов принадлежали к роду *Raenibacillus* (K1.14, O1.27, O2.11, P3.13, P4.5, P4.24, P5.31, P6.14), 12 – к роду *Bacillus* (V3.14, P4.6, B7/2, K11, K13, K14, K11/2, K12/2, K12/1, K17, K111, K112). Штаммы из Краснодарского края обозначены F1, из Воронежской и Курской областей – F2 [31].

Для оценки фосфатмобилизующей активности использовался коммерческий пробиотический штамм, входящий в состав препарата «Фосфатовит» (*Bacillus mucilaginosus* В-8966). Бактерии, в нем содержащиеся, переводят фосфор из почвы в усвояемую растениями форму. Применение «Фосфатовита» совместно с «Азотовитом» положительно влияет на рост гороха [32] и зерновых культур [33].

Все штаммы культивировали при температуре 28–29 °С.

Оценка синтеза сидерофоров. Для оценки синтеза сидерофоров суточные культуры исследуемых штаммов инокулировали уколом в синий агар в трех биологических повторностях. Применялась методика [34] с модификациями.

Для приготовления 1 л синего агара 60,5 мг хромазурол-сульфата CAS («Вектон») растворяли в 50 мл воды и смешивали с 10 мл раствора железа (III) (1 мМ FeCl₃·6H₂O, 10 мМ HCl). При перемешивании этот раствор медленно добавляли к 72,9 мг цетавлона (Hexadecyltrimethylammonium Bromide, HDTMA), растворенного в 40 мл воды.

Полученную темно-синюю жидкость подвергали автоклавированию (2 атм., 20 мин стерилизация). Питательная основа была заменена на R2A-агар (вода бидистиллированная – 1 л, пептон ферментативный – 0,5 г, казаминовые кислоты – 0,5 г, дрожжевой экстракт – 0,5 г, глюкоза – 0,5 г, растворимый крахмал – 0,5 г, K₂HPO₄ – 0,3 г, MgSO₄·7H₂O – 0,05 г, пируват Na – 0,3 г, агар – 15 г), разбавленный в 10 раз, pH ~ 6,5.

Горячий раствор красителя вливали вдоль стеклянной стенки колбы в расплавленный агар так, чтобы добиться смешивания без образования лишней пены в пропорции 1 часть реактива к 9 частям среды. Из-за конкуренции с сидерофором за ион металла в среде происходит распад соединения CAS-HDTMA, в результате чего наблюдаются зоны просветления. Инкубировали 14 сут при температуре 25 °С, затем оценивали наличие светлой зоны вокруг уколов.

Оценка фосфатмобилизующей активности. Для выявления способности бактерий высвободить фосфат из неорганических соединений проводили культивирование штаммов микроорганизмов на питательной среде National Botanical Research Institute's Phosphate (NBRIP) [35]: MgCl₂·6H₂O – 5 г/л; MgSO₄·H₂O – 0,25 г/л; KCl – 0,2 г/л; (NH₄)₂SO₄ – 0,1 г/л; Ca₃(PO₄)₂ – 5 г/л; глюкоза – 10 г/л; агар-агар – 1,5 % от объема среды. Перед автоклавированием pH среды довели до 7,0.

В данной питательной среде источником фосфора является нерастворимая соль Ca₃(PO₄)₂. Фосфат кальция автоклавировали отдельно от остальных компонентов, после чего в условиях ламинарного бокса смешивали с остальными стерильными компонентами среды сразу после автоклавирования [36].

Все штаммы перед посевом на питательную среду NBRIP были предварительно выращены на среде КДА для получения суточной и активно растущей культуры. Суточную культуру каждого штамма для теста засеивали короткими штрихами на краю чашек на среде NBRIP в трёхкратной биологической повторности. Инкубацию проводили в течение 14 дней при 30 °С. После инкубации бактерий фиксировали появление прозрачных зон вокруг бактериальных колоний по принципу есть/нет. Появление такой зоны свидетельствовало о наличии фосфатмобилизующей активности у анализируемых штаммов бактерий [37, 38].

Кроме того, была проведена оценка фосфатмобилизующей активности путем измерения диаметров зоны гало (прозрачная зона, формирующаяся под колониями при использовании фосфатов) и диаметров колоний микроорганизмов с помощью штангенциркуля для последующего вычисления индекса мобилизации фосфатов (ИМФ, phosphate solubilizing index (PSI) [39–42], а также схожего индекса растворения фосфатов (ИРФ, solubilizing index (SI) [43]:

$$\text{ИМФ} = \frac{\text{Общий диаметр (гало + диаметр колонии)}}{\text{Диаметр колонии}}, \quad \text{ИРФ} = \frac{\text{Общий диаметр} - \text{диаметр колонии}}{\text{Диаметр колонии}}.$$

Оценка синтеза ИУК. Для оценки синтеза ИУК в течение суток инкубировали культуры штаммов на плотной питательной среде (картофельно-декстрозный агар), затем переносили в жидкую питательную среду (D-глюкоза – 1 г/л; пептон – 15 г/л; NaCl – 6 г/л; дрожжевой экстракт – 3 г/л; pH=7,5) и инкубировали 24 ч при температуре 28–29 °С и скорости вращения 220–240 об/мин. Затем культуры доводили до плотности 1 мКФ, отбирали по 50 мкл каждой и вносили в 5 мл жидкой среды того же состава с добавлением 0,15%-го триптофана. Культуры инкубировали в течение 7 сут. Результаты снимали через 1, 2 и 7 дней (1,5 мл). Культуральную жидкость осаждали при 8000 об/мин, отбирали супернатант, в соотношении 1:1 добавляли реактив Сальковского (для приготовления 200 мл реактива использовали 120 мл 50%-го HClO₄, 76 мл H₂O и 0,5406 г FeCl₃, предварительно смешанные с 4 мл H₂O), инкубировали в темноте 25 мин и оценивали развитие розовой окраски с помощью FLUOstar Omega при длине волны 530 нм.

Для оценки способности исследуемых штаммов синтезировать ИУК была построена калибровочная кривая (рис. 1).

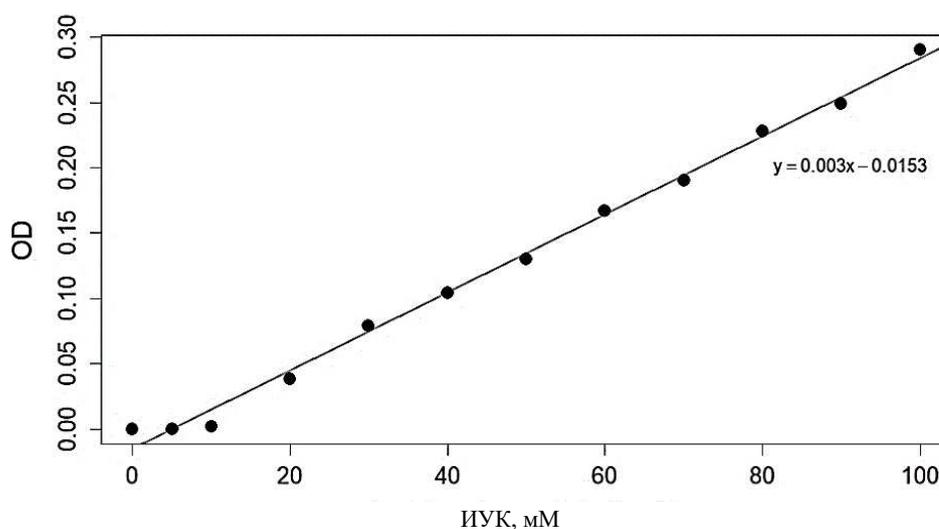


Рис. 1. Калибровочная кривая для ИУК. По горизонтальной оси отложено количество ИУК, по вертикальной – интенсивность поглощения / Fig. 1. Calibration curve for indolyacetic acid. The horizontal axis shows the amount of indolyacetic acid, the vertical axis shows the absorption intensity

Статистическая обработка. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием критерия Манна – Уитни, все обсчеты и визуализацию – R и пакетов tidy, dplyr, ggplot2.

Результаты и обсуждение

Оценка активности синтеза сидерофоров. Сидерофоры продуцировали 2 штамма из 10 (род *Raenibacillus*) и 11 из 12 (род *Bacillus*). Такое распределение нетипично для данных родов – и *Bacillus* spp., и *Raenibacillus* spp. способны синтезировать сидерофоры. Например, зона ризосферы перца, каучуковых деревьев и помидоров использовалась для выделения бактерий – продуцентов сидерофоров. Наиболее активно синтезирующий сидерофоры штамм определен авторами как *Bacillus subtilis*. Интересно, что он также ингибировал рост фитопатогенного гриба рода *Fusarium* [44], 12 штаммов рода *Bacillus*, выделенных из ризосферы сои, продуцировали сидерофоры и проявляли антагонистические свойства по отношению к фитопатогенам – *Fusarium oxysporum*, *Sclerotium rolfsii*, *Rhizoctonia solani* [45]. Азотфиксирующий штамм *Paenibacillus triticisoli* BJ-18 также синтезировал сидерофоры, но, судя по зоне просветления, в меньшем количестве [46].

Оценка активности мобилизации фосфора. Результаты оценки фосфатмобилизации представлены на рис. 2. Подавляющее большинство используемых штаммов бактерий-антагонистов способны мобилизовать фосфор из Ca₃(PO₄)₂. Штаммы, входящие в состав пробиотических препаратов, показали очень слабую фосфатмобилизующую активность, или ее не было.

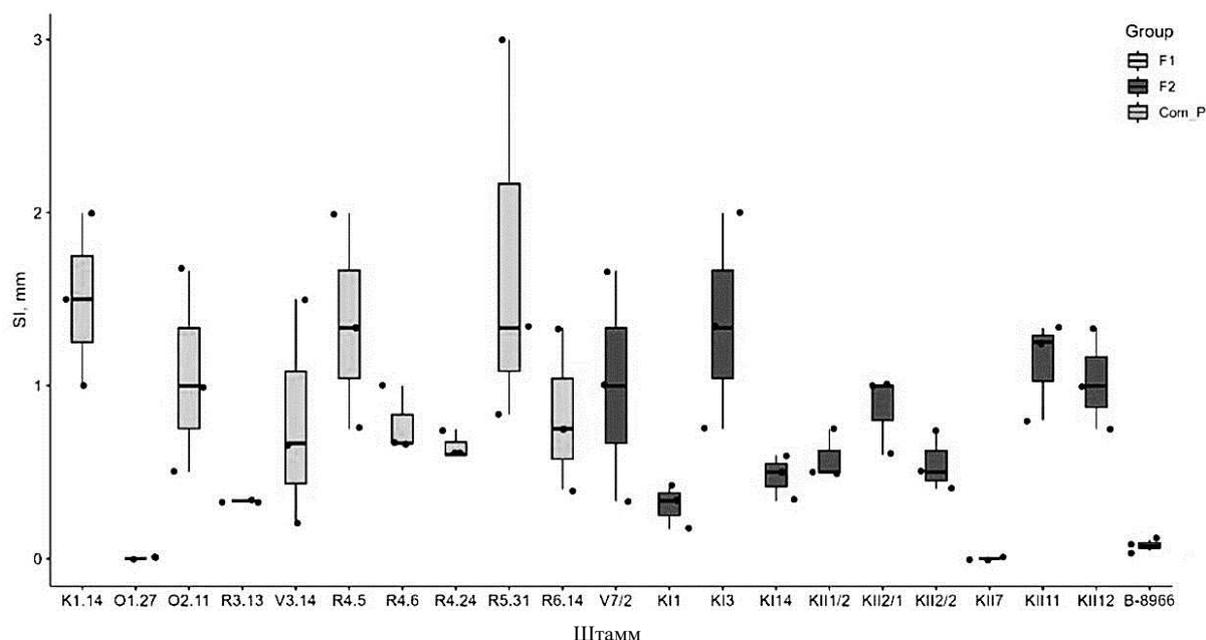


Рис. 2. Оценка фосфатмобилизующей активности исследуемых штаммов по значениям ИМФ (SI, solubilizing index). F1 и F2 – группы бактерий-антагонистов, выделенных из ризосферы растений, Com_P – пробиотический препарат «Фосфатофит» (B-8966) / Fig. 2. Evaluation of the phosphate-mobilizing activity of the studied strains based on the phosphate mobilization index (SI, solubilizing index). F1 and F2 - antagonist bacteria isolated from the plant rhizosphere, Com_P - probiotic preparation “Phosphatophyte” (B-8966)

Только штаммы O1.27 и K117 неспособны высвобождать фосфор из неорганических соединений, о чём свидетельствует отсутствие прозрачных зон под растущими колониями. Наиболее высокой фосфатмобилизующей активностью обладали штаммы K1.14, O2.11, R4.5, R5.31, B7/2, K13, K111 и K112. Разницы в активности групп F1 и F2 не наблюдается. Сравнение фосфатмобилизующей активности по родам *Bacillus* и *Paenibacillus* представлено на рис. 3.

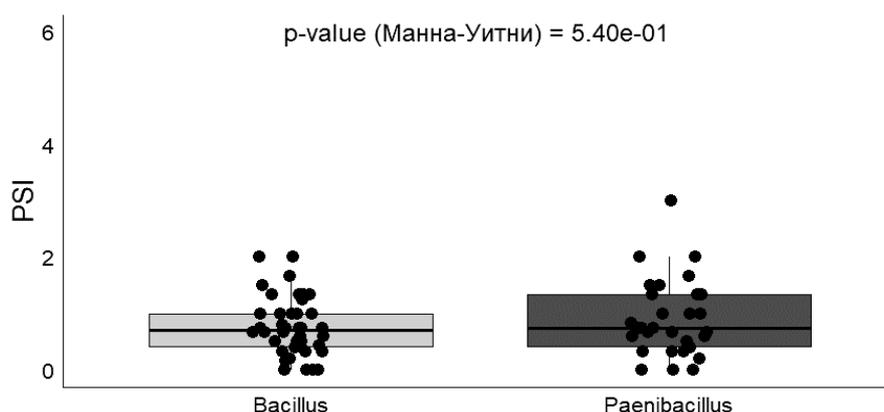


Рис. 3. Сравнительная оценка фосфатмобилизующей активности штаммов родов *Paenibacillus* и *Bacillus* / Fig. 3. Comparative assessment of the phosphate-mobilizing activity of strains of *Paenibacillus* and *Bacillus*

Интересно, что представители бактерий рода *Bacillus* считаются доминирующими среди фосфатмобилизующих бактерий [47], тогда как для рода *Paenibacillus* такой сильной фосфатмобилизующей активности обычно не наблюдается. Тем не менее в данном случае бактерии рода *Paenibacillus* показали достаточно высокую активность.

Сравнение исследуемых штаммов с коммерческим представлено на рис. 3. «Фосфатовит» демонстрирует гораздо более низкую фосфатмобилизующую активность, хотя и используется для повышения уровня потребления фосфора растениями за счет перевода фосфатов бактериями в

легкоусвояемую форму. Таким образом, исследуемые препараты демонстрируют высокий потенциал и могут применяться в сельском хозяйстве как высокоэффективные штаммы, упрощающие получение фосфора растениями.

Оценка способности синтезировать ИУК. Количество ИУК, наработанной штаммами за вторые сутки по сравнению с первыми, представлено на рис. 4. Наблюдается заметная разница между продукцией ИУК штаммами F1 и F2. Практически все штаммы F2 синтезировали большее количество ИУК через двое суток, наибольшее – штаммы КП11 и КП12 (6,00 и 6,35 мг/л).

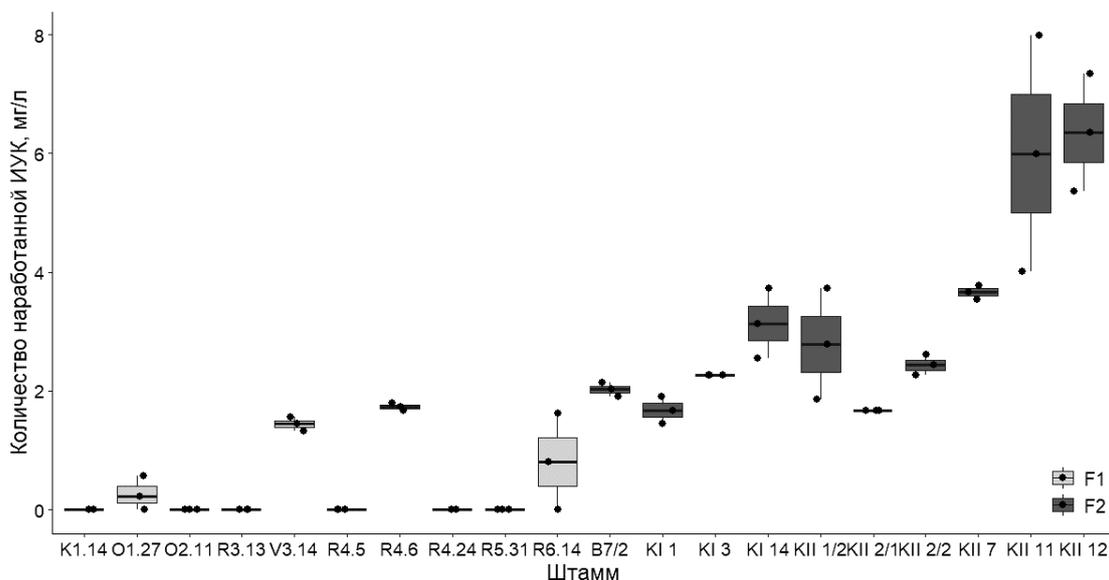


Рис. 4. Количество ИУК, синтезированной штаммами через 2 сут
 / Fig. 4. The amount of indolyacetic acid synthesized by strains after 2 days

Часть штаммов F1 (K1,14, O2.11, R3.13, R4.5, R4.24, R5.31) не продемонстрировала активного синтеза ИУК. При этом штаммы F1, относящиеся к роду *Bacillus* (V3.14, R4.6), показали более высокую активность.

Согласно рис. 5, штаммы рода *Bacillus* синтезировали значительно большее количество ИУК через двое суток, чем штаммы рода *Paenibacillus*.

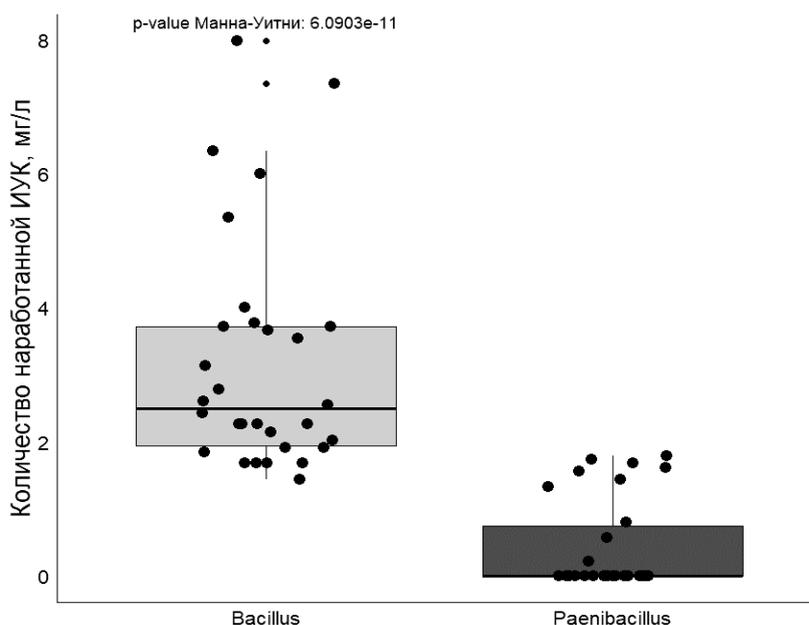


Рис. 5. Сравнение количества ИУК, синтезированной штаммами родов *Bacillus* и *Paenibacillus* через 2 сут
 / Fig. 5. Comparison of the amount of indolyacetic acid synthesized by *Bacillus* and *Paenibacillus* strains after 2 days

Результаты синтеза ИУК штаммами через 7 сут представлены на рис. 6. Как и спустя двое суток, штаммы F2 являются более сильными продуцентами ИУК, чем F1. Из F1 наиболее высокие результаты демонстрируют штаммы, относящиеся к роду *Bacillus*.

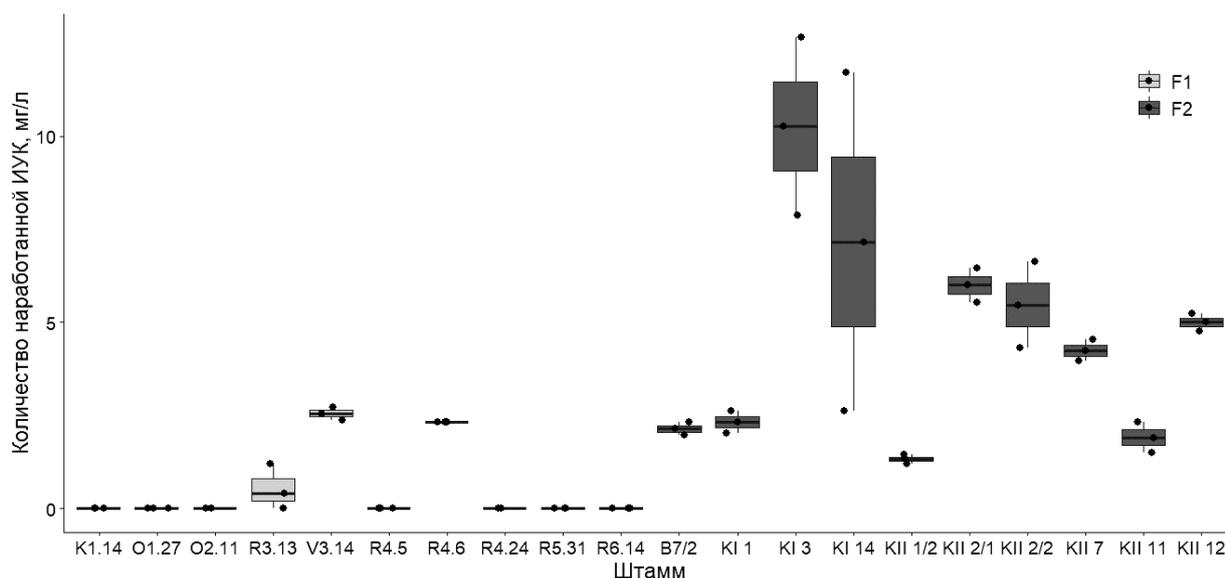


Рис. 6. Количество ИУК, синтезированной штаммами через 7 сут
 / Fig. 6. The amount of indolyacetic acid synthesized by strains after 7 days

Наибольшее количество ИУК спустя 7 дней синтезировали штаммы K13 и K114 – более 10 мг/л. Самыми слабыми продуцентами оказались K1,14, O2,11, R4,5, R4,24, R5,31, R6,14. Среди штаммов F2 наименьшее количество ИУК синтезировали штаммы K11,1, B7/2, K11 и K11,1. Сравнение штаммов по способности синтезировать ИУК в зависимости от рода представлено на рис. 7.

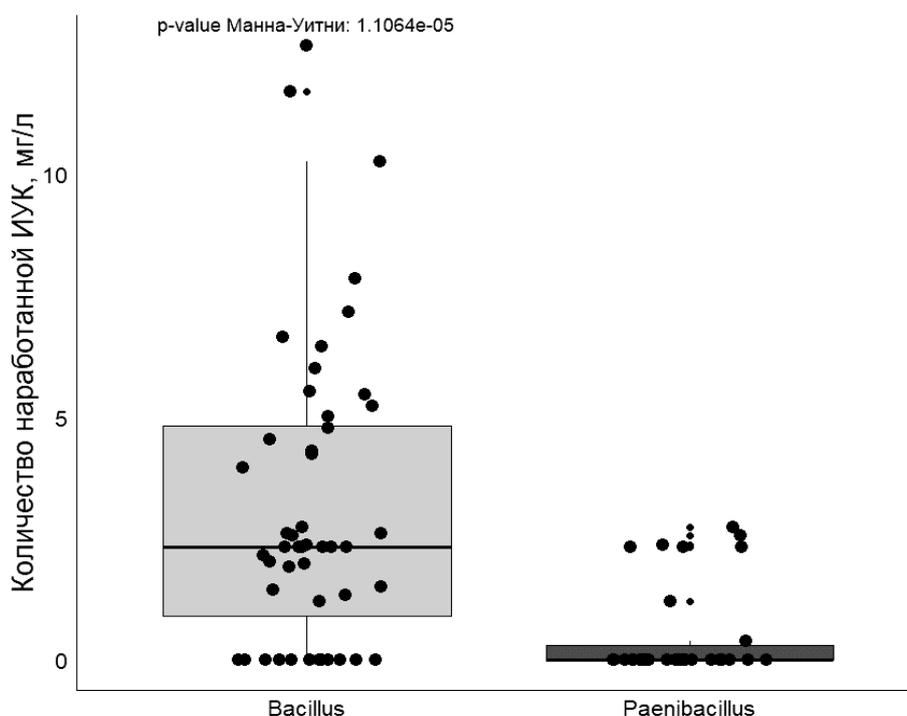


Рис. 7. Сравнение количества ИУК, синтезированной штаммами родов *Bacillus* и *Paenibacillus* через 7 сут
 / Fig. 7. Comparison of the amount of indolyacetic acid synthesized by *Bacillus* and *Paenibacillus* strains after 7 days

Как и спустя двое суток, представители рода *Bacillus* синтезировали большее количество ИУК, чем рода *Paenibacillus*. Схожие результаты были показаны в ряде работ: представители рода *Bacillus* являются одними из самых активных с точки зрения синтеза ауксинов. В [48] из ризосферы были выделены 4 штамма *Bacillus cereus*. Штамм ВС-Он синтезировал наибольшее количество ИУК через 72 ч – 46,25 мг/л [48]. Из ризосферной области *Solanum Nigrum* было выделено 8 бактериальных штаммов, *Malvastrum tricuspidatum* – 2,2 штамма, синтезировавшие ИУК (So3II и Mt3b), определены как *Bacillus cereus* и *Bacillus subtilis* и синтезировали 35,8 и 36,6 мг/мл [49].

Результаты оценки биохимической активности представлены в таблице. Способность синтезировать сидерофоры оценивалась качественно, зафиксировано ее наличие (+) или отсутствие (–).

Способность синтезировать сидерофоры и ИУК, оценка фосфатмобилизирующей активности исследованных штаммов бактерий и «Фосфатовита» / Ability to synthesize siderophores and indolyacetic acid, and the ability to phosphate mobilize the studied bacterial strains of the commercial strain “Phosphatovit”

	Штамм	Синтез сидерофоров	Фосфатмобилизация, ИМФ	ИУК, мг/л	
				через 2 сут	через 7 сут
<i>Paenibacillus</i>	K1.14	+	2,5	0,00	0,39
	O1.27	–	0,00	0,22	2,55
	O2.11	–	2,06	0,00	0,00
	P3.13	+	1,33	0,00	2,32
	P4.5	–	2,36	1,44	0,00
	P4.24	–	1,65	0,00	0,00
	P5.31	–	2,72	1,73	0,00
	P6.14	–	1,83	0,00	2,14
<i>Bacillus</i>	V3.14	+	1,79	0,00	2,32
	P4.6	+	1,78	0,80	10,26
	B7/2	+	2,00	2,03	7,17
	KII	+	1,31	1,68	1,33
	KI3	+	2,36	2,26	6,00
	KII4	–	1,48	3,14	5,47
	KII1/2	+	1,58	2,79	4,25
	KII2/1	+	1,87	1,68	1,91
	KII2/2	+	1,55	2,44	5,00
	KII7	+	0,00	3,66	0,39
	KIII1	+	2,13	6,00	2,55
	KIII2	+	2,03	6,35	0,00
Пробиотики	«Фосфатовит»		1,08		

Типичные для демонстрирующих и не демонстрирующих каждую активность штаммов результаты показаны на рис. 8.

11 штаммов *Bacillus* из 12 способны синтезировать сидерофоры. Штаммы рода *Bacillus* более активно синтезировали ИУК, чем штаммы рода *Paenibacillus*.

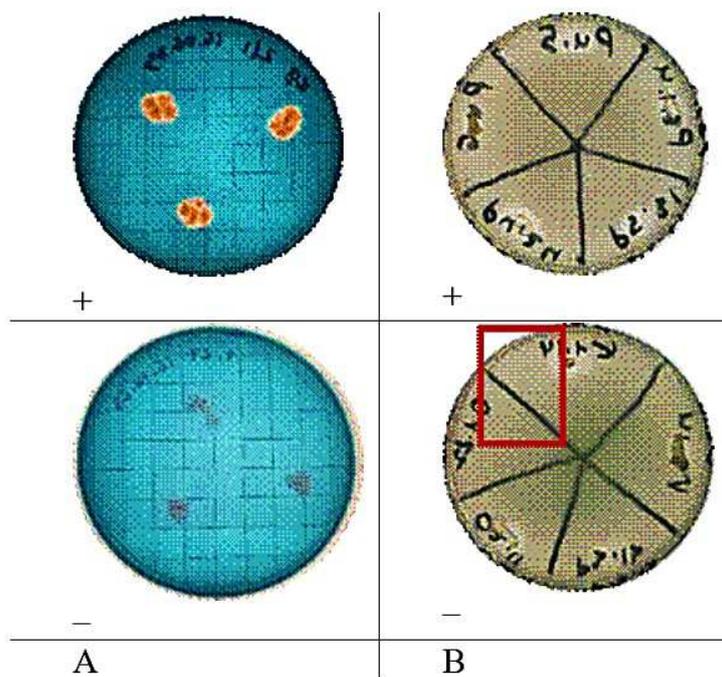


Рис. 8. Штаммы, демонстрирующие (+) или не демонстрирующие (-) способность синтезировать сидерофоры – А; мобилизовать фосфаты – В (штамм, способный к фосфатмобилизации, выделен рамкой)
/ Fig. 8. Strains demonstrating (+) or not demonstrating (-) the ability to synthesize siderophores - A; mobilize phosphates - B (a strain capable of phosphate mobilization is highlighted in a frame)

Заключение

За исключением одного, все штаммы рода *Bacillus* и всего 2 штамма из 10 рода *Paenibacillus* синтезировали сидерофоры. 20 из 22 штаммов бактерий ризосферы оказались способны мобилизовать фосфаты. Для относительной оценки активности фосфатмобилизации проведено сравнение исследуемых штаммов с коммерческим препаратом. Оказалось, что исследуемые штаммы могут быть более эффективны при применении в сельском хозяйстве, чем исследованный коммерческий препарат. Штаммы КИ14 и КИ3 активно синтезировали ИУК на 7-й день, КИ11, КИ12 – на 2-й.

Данные штаммы могут быть классифицированы как PGPR и использованы для создания био-препаратов для сельского хозяйства. PGPR являются потенциально универсальными биостимуляторами, их применение представляет собой экологически безопасный подход и перспективный метод повышения эффективности и качества сельскохозяйственного производства.

Список источников

1. Gyimah J., Saalidong B.M., Nibonmua L.K.M. The battle to achieve Sustainable Development Goal Two: The role of environmental sustainability and government institutions // PloS ONE. 2023. Vol. 18, № 9. Art. e0291310. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291310>
2. Synergy Solutions for a World in Crisis: Tackling Climate and SDG Action Together: Report on Strengthening the Evidence Base - First Edition. United Nations. 2023. <https://doi.org/10.18356/9789213585238>
3. World Health Organization. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum. Rome, 2023. 316 p. <https://doi.org/10.4060/cc3017en>
4. Poutanen K.S., K arlund A.O., G omez-Gallego C., Johansson D.P., Scheers N.M., Marklinder I.M., Eriksen A.K., Silventoinen P.C., Nordlund E., Sozer N., Hanhineva K.J., Kolehmainen M., Landberg R. Grains – a major source of sustainable protein for health // Nutrition Reviews. 2022. Vol. 80, № 6. P. 1648–1663. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuab084>

5. *Lopes M.J. S., Dias-Filho M.B., Gurgel E.S. C.* Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 5. Art. 606454. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454>
6. *Ahmed E., Holmström S.J. M.* Siderophores in environmental research: roles and applications // *Microbial Biotechnology*. 2014. Vol. 7, № 3. P. 196–208. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12117>
7. *Timofeeva A.M., Galyamova M.R., Sedykh S.E.* Bacterial siderophores: Classification, biosynthesis, perspectives of use in agriculture // *Plants*. 2022. Vol. 11, № 22. P. 3065. <https://doi.org/10.3390/plants11223065>
8. *Arif M.S., Riaz M., Shahzad S.M., Yasmeen T., Ali S., Akhtar M.J.* Phosphorus-mobilizing rhizobacterial strain *Bacillus cereus* GS6 improves symbiotic efficiency of soybean on an Aridisol amended with phosphorus-enriched compost // *Pedosphere*. 2017. Vol. 27, № 6. P. 1049–1061. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60366-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60366-7)
9. *Brito L.F., López M.G., Straube L., Passaglia L. M.P., Wendisch V.F.* Inorganic phosphate solubilization by rhizosphere bacterium *Paenibacillus sonchi*: gene expression and physiological functions // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. Art. 588605. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.588605>
10. *Wang H., Liu R., You M.P., Barbetti M.J., Chen Y.* Pathogen biocontrol using plant growth-promoting bacteria (PGPR): Role of bacterial diversity // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, № 9. Art. 1988. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091988>
11. *Li J., Zhao Y., Chu H., Wang L., Fu Y., Liu P., Upadhyaya N., Chen C., Mou T., Feng Y., Kumar P., Xu J.* SHOEBOX modulates root meristem size in rice through dose-dependent effects of gibberellins on cell elongation and proliferation // *PLoS Genetics*. 2015. Vol. 11, № 8. Art. e1005464. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005464>
12. *Street I.H., Aman S., Zubo Y., Ramzan A., Wang X., Shakeel S.N., Kieber J.J., Schaller G.E.* Ethylene inhibits cell proliferation of the Arabidopsis root meristem // *Plant Physiology*. 2015. Vol. 169, № 1. P. 338–350. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00415>
13. *Qin H., Huang R.* Auxin controlled by ethylene steers root development // *Int. J. of Molecular Sciences*. 2018. Vol. 19, № 11. Art. 3656. <https://doi.org/10.3390/ijms19113656>
14. *Woodward A.W., Bartel B.* Auxin: regulation, action, and interaction // *Annals of Botany*. 2005. Vol. 95, № 5. P. 707–735. <https://doi.org/10.1093/aob/mci083>
15. *Hu Y., Vandenbussche F., Van Der Straeten D.* Regulation of seedling growth by ethylene and the ethylene-auxin crosstalk // *Planta*. 2017. Vol. 245, № 3. P. 467–489. <https://doi.org/10.1007/s00425-017-2651-6>
16. *Olatunji D., Geelen D., Verstraeten I.* Control of endogenous auxin levels in plant root development // *Int. J. of Molecular Sciences*. 2017. Vol. 18, № 12. Art. 2587. <https://doi.org/10.3390/ijms18122587>
17. *Zhao Y.* Auxin biosynthesis and its role in plant development // *Annual Review of Plant Biology*. 2010. Vol. 61. P. 49–64. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112308>
18. *Fukaki H., Tasaka M.* Hormone interactions during lateral root formation // *Plant Molecular Biology*. 2009. Vol. 69. P. 437–449. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9417-2>
19. *Ishida T., Kurata T., Okada K., Wada T.* A genetic regulatory network in the development of trichomes and root hairs // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2008. Vol. 59. P. 365–386. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant.59.032607.092949>
20. *Péret B., De Rybel B., Casimiro I., Benková E., Swarup R., Laplaze L., Beeckman T., Bennett M. J.* Arabidopsis lateral root development: an emerging story // *Trends in Plant Science*. 2009. Vol. 14, № 7. P. 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.05.002>
21. *Rahman A., Hosokawa S., Oono Y., Amakawa T., Goto N., Tsurumi S.* Auxin and ethylene response interactions during Arabidopsis root hair development dissected by auxin influx modulators // *Plant Physiology*. 2002. Vol. 130, № 4. P. 1908–1917. <https://doi.org/10.1104/pp.010546>
22. *Chen Q., Dai X., De-Paoli H., Cheng Y., Takebayashi Y., Kasahara H., Kamiya Y., Zhao Y.* Auxin overproduction in shoots cannot rescue auxin deficiencies in Arabidopsis roots // *Plant and Cell Physiology*. 2014. Vol. 55, № 6. P. 1072–1079. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcu039>
23. *Meuwly P., Pilet P.E.* Local treatment with indole-3-acetic acid induces differential growth responses in *Zea mays* L. roots // *Planta*. 1991. Vol. 185. P. 58–64. <https://doi.org/10.1007/BF00194515>
24. *Pilet P.E., Saugy M.* Effect on root growth of endogenous and applied IAA and ABA: a critical reexamination // *Plant Physiology*. 1987. Vol. 83, № 1. P. 33–38. <https://doi.org/10.1104/pp.83.1.33>
25. *Zhao Y.* Auxin biosynthesis // *The Arabidopsis Book*. 2014. № 12. <https://doi.org/10.1199/tab.0173>
26. *Mano Y., Nemoto K.* The pathway of auxin biosynthesis in plants // *Journal of Experimental Botany*. 2012. Vol. 63, № 8. P. 2853–2872. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers091>
27. *Duca D., Lorz J., Patten C.L., Rose D., Glick B.R.* Indole-3-acetic acid in plant-microbe interactions // *Antonie Van Leeuwenhoek*. 2014. Vol. 106. P. 85–125. <https://doi.org/10.1007/s10482-013-0095-y>
28. *Patten C.L., Glick B.R.* Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system // *Applied and Environmental Microbiology*. 2002. Vol. 68, № 8. P. 3795–3801. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>

29. Tao Y., Ferrer J. L., Ljung K., Pojer F., Hong F., Long J.A., Li L., Moreno J.E., Bowman M.E., Ivans L.J. et al. Rapid synthesis of auxin via a new tryptophan-dependent pathway is required for shade avoidance in plants // *Cell*. 2008. Vol. 133, № 1. P. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2008.01.049>

30. Glass N.L., Kosuge T. Cloning of the gene for indoleacetic acid-lysine synthetase from *Pseudomonas syringae* subsp. *savastanoi* // *J. of Bacteriology*. 1986. Vol. 166, № 2. P. 598–603. <https://doi.org/10.1128/jb.166.2.598-603.1986>

31. Патент № 2724464 РФ, МПК51 C12N 1/20; АО1N 63/100, А01С 1/06. 2019139147. Штаммы для биологической защиты сельскохозяйственных культур от фузариоза. / В.А. Чистяков, А.В. Горюцов, А.В. Усатов, Е.В. Празднова, М.С. Мазанко, А.Б. Брень, О.А. Усатова, Н.Г. Васильченко. Заявл. 02.12.2019. Оpubл. 23.06.2020.

32. Михайлова Н.Н., Елисеева Л.В. Применение микробиологических удобрений «Азотовит» и «Фосфатовит» при возделывании гороха // Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары: Чувашский гос. аграр. унт-т, 2022. С. 171–176.

33. Резанова Г.И., Иванченко Т.В. Влияние микробиологических удобрений «Азотовит» и «Фосфатовит» на развитие и продуктивность зерновых культур // Науч.-агроном. журн. 2012. №. 1. С. 15–21. EDN: WDHXYR.

34. Schwyn B., Neilands J.B. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores // *Analytical Biochemistry*. 1987. Vol. 160, № 1. P. 47–56. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90612-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9)

35. Nautiyal C. S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms // *FEMS Microbiology Letters*. 1999. Vol. 170, № 1. P. 265–270. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x>

36. Park J.H., Bolan N., Megharaj M., Naidu R. Isolation of phosphate solubilizing bacteria and their potential for lead immobilization in soil // *J. of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 185, № 2–3. P. 829–836. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.095>

37. Behera B.C., Singdevsachan S.K., Mishra R.R., Dutta S.K., Thatoi H.N. Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove – a review // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2014. Vol. 3, № 2. P. 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.008>

38. Chen Y.P., Rekha P.D., Arun A.B., Shen F.T., Lai W.-A., Young C.C. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities // *Applied Soil Ecology*. 2006. Vol. 34, № 1. P. 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.12.002>

39. Birmole R., Kazi N. A study on the optimization of phosphate solubilizing potential of bacteria and their effect on plant growth when applied individually and in a consortium // *J. of Advanced Scientific Research*. 2020. Vol. 11, suppl. 6. P. 69–79.

40. Khatoon N., Khan M. Evaluation of *Bacillus subtilis* MRB4, as plant growth promoter and potential phosphate solubilizer under abiotic stress // *J. of Appl. Biology and Biotechnology*. 2020. Vol. 8, iss. 5. P. 27–35. <https://doi.org/10.7324/JABB.2020.80504>

41. Kunwar V.S., Chimouriya S., Lamichhane J., Gauchan D.P. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from rhizosphere of coffee plant and evaluating their effects on growth and development of coffee seedlings // *Biotechnol Ind J*. 2018. Vol. 14, iss. 5. Art. 173.

42. Surovy M. Z., Gupta D. R., Rahman M. M., Akanda M. A. M., Islam M. T. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from traditional rice cultivar of Bangladesh and their effects on rice // *Annals of Bangladesh Agriculture*. 2017. Vol. 21, № 1-2. P. 27–37.

43. Li K., Van Zeghbroeck J., Liu Q., Zhang S. Isolating and characterizing phosphorus solubilizing bacteria from rhizospheres of native plants grown in calcareous soils // *Frontiers in Environmental Science*. 2021. Vol. 9. Art. 802563. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.802563>

44. Yu X., Ai C., Xin L., Zhou G. The siderophore-producing bacterium, *Bacillus subtilis* CAS15, has a biocontrol effect on *Fusarium* wilt and promotes the growth of pepper // *European J. of Soil Biology*. 2011. Vol. 47, № 2. P. 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.11.001>

45. Wahyudi A.T., Astuti R.P., Widayati A., Meryandini A., Nawangsih A.A. Characterization of *Bacillus* sp. strains isolated from rhizosphere of soybean plants for their use as potential plant growth for promoting rhizobacteria // *J. Microbiol Antimicrob*. 2011. Vol. 3, № 2. P. 34–40.

46. Zhang Y., Ren J., Wang W., Chen B., Li E., Chen S. Siderophore and indolic acid production by *Paenibacillus triticisoli* BJ-18 and their plant growth-promoting and antimicrobe abilities // *Peer J*. 2020. Vol. 8. Art. e9403. <https://doi.org/10.7717/peerj.9403>

47. Meena V.S., Maurya B.R., Meena S.K., Meena R.K., Kumar A., Verma J.P., Singh N.P. Can *Bacillus* species enhance nutrient availability in agricultural soils? // *Bacilli and Agrobiotechnology*. Springer, 2016. P. 367–395. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3_16

48. Ozdal M., Ozdal Ö., Sezen A., Algur Ö. Biosynthesis of indole-3-acetic acid by *Bacillus cereus* immobilized cells // *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2016. Vol. 37, № 3. P. 212–222.

49. Wagi S., Ahmed A. *Bacillus* spp.: potent microfactories of bacterial IAA // Peer J. 2019. Vol. 7. Art. e7258. <https://doi.org/10.7717/peerj.7258>

References

1. Gyimah J., Saalidong B.M., Nibonmua L.K.M. The battle to achieve Sustainable Development Goal Two: The role of environmental sustainability and government institutions. *PLoS ONE*. 2023;18(9):e0291310. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291310>
2. *Synergy Solutions for a World in Crisis: Tackling Climate and SDG Action Together: Report on Strengthening the Evidence Base - First Edition 2023*. United Nations. 2023. <https://doi.org/10.18356/9789213585238>
3. World Health Organization. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum*. Rome, 2023. 316 p. <https://doi.org/10.4060/cc3017en>
4. Poutanen K.S., Kårlund A.O., Gómez-Gallego C., Johansson D.P., Scheers N.M., Marklinder I.M., Eriksen A.K., Silventoinen P.C., Nordlund E., Sozer N., Hanhineva K.J., Kolehmainen M., Landberg R. Grains - a major source of sustainable protein for health. *Nutrition Reviews*. 2022;80(6):1648-1663. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuab084>
5. Lopes M.J.S., Dias-Filho M.B., Gurgel E.S. C. Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021;5:606454. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454>
6. Ahmed E., Holmström S. J. M. Siderophores in environmental research: roles and applications. *Microbial Biotechnology*. 2014;7(3):196-208. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12117>
7. Timofeeva A. M., Galyamova M. R., Sedykh S. E. Bacterial siderophores: Classification, biosynthesis, perspectives of use in agriculture. *Plants*. 2022;11(22):3065. <https://doi.org/10.3390/plants11223065>
8. Arif M.S., Riaz M., Shahzad S.M., Yasmeen T., Ali S., Akhtar M.J. Phosphorus-mobilizing rhizobacterial strain *Bacillus cereus* GS6 improves symbiotic efficiency of soybean on an Aridisol amended with phosphorus-enriched compost. *Pedosphere*. 2017;27(6):1049-1061. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60366-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60366-7)
9. Brito L.F., López M. G., Straube L., Passaglia L. M. P., Wendisch V. F. Inorganic phosphate solubilization by rhizosphere bacterium *Paenibacillus sonchi*: gene expression and physiological functions. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:588605. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.588605>
10. Wang H., Liu R., You M.P., Barbetti M.J., Chen Y. Pathogen biocontrol using plant growth-promoting bacteria (PGPR): Role of bacterial diversity. *Microorganisms*. 2021;9(9):1988. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091988>
11. Li J., Zhao Y., Chu H., Wang L., Fu Y., Liu P., Upadhyaya N., Chen C., Mou T., Feng Y., Kumar P., Xu J. SHOBOX modulates root meristem size in rice through dose-dependent effects of gibberellins on cell elongation and proliferation. *PLoS Genetics*. 2015;11(8):e1005464. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005464>
12. Street I.H., Aman S., Zubo Y., Ramzan A., Wang X., Shakeel S. N., Kieber J.J., Schaller G.E. Ethylene inhibits cell proliferation of the Arabidopsis root meristem. *Plant Physiology*. 2015;169(1):338-350. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00415>
13. Qin H., Huang R. Auxin controlled by ethylene steers root development. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018;19(11):3656. <https://doi.org/10.3390/ijms19113656>
14. Woodward A. W., Bartel B. Auxin: regulation, action, and interaction. *Annals of Botany*. 2005;95(5):707-735. <https://doi.org/10.1093/aob/mci083>
15. Hu Y., Vandenbussche F., Van Der Straeten D. Regulation of seedling growth by ethylene and the ethylene-auxin crosstalk. *Planta*. 2017;245(3):467-489. <https://doi.org/10.1007/s00425-017-2651-6>
16. Olatunji D., Geelen D., Verstraeten I. Control of endogenous auxin levels in plant root development. *International Journal of Molecular Sciences*. 2017;18(12):2587. <https://doi.org/10.3390/ijms18122587>
17. Zhao Y. Auxin biosynthesis and its role in plant development. *Annual Review of Plant Biology*. 2010;61:49-64. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112308>
18. Fukaki H., Tasaka M. Hormone interactions during lateral root formation. *Plant Molecular Biology*. 2009;69:437-449. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9417-2>
19. Ishida T., Kurata T., Okada K., Wada T. A genetic regulatory network in the development of trichomes and root hairs. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2008;59:365-386. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092949>
20. Péret B., De Rybel B., Casimiro I., Benková E., Swarup R., Laplace L., Beeckman T., Bennett M. J. Arabidopsis lateral root development: an emerging story. *Trends in Plant Science*. 2009;14(7):399-408. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.05.002>
21. Rahman A., Hosokawa S., Oono Y., Amakawa T., Goto N., Tsurumi S. Auxin and ethylene response interactions during Arabidopsis root hair development dissected by auxin influx modulators. *Plant Physiology*. 2002;130(4):1908-1917. <https://doi.org/10.1104/pp.010546>

22. Chen Q., Dai X., De-Paoli H., Cheng Y., Takebayashi Y., Kasahara H., Kamiya Y., Zhao Y. Auxin overproduction in shoots cannot rescue auxin deficiencies in Arabidopsis roots. *Plant and Cell Physiology*. 2014;55(6):1072-1079. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcu039>
23. Meuwly P., Pilet P.E. Local treatment with indole-3-acetic acid induces differential growth responses in *Zea mays* L. roots. *Planta*. 1991;185:58-64. <https://doi.org/10.1007/BF00194515>
24. Pilet P.E., Saugy M. Effect on root growth of endogenous and applied IAA and ABA: a critical reexamination. *Plant Physiology*. 1987;83(1):33-38. <https://doi.org/10.1104/pp.83.1.33>
25. Zhao Y. Auxin biosynthesis. *The Arabidopsis Book*. 2014;(12). <https://doi.org/10.1199/tab.0173>
26. Mano Y., Nemoto K. The pathway of auxin biosynthesis in plants. *Journal of Experimental Botany*. 2012;63(8):2853-2872. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers091>
27. Duca D., Lorv J., Patten C.L., Rose D., Glick B.R. Indole-3-acetic acid in plant-microbe interactions. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 2014;106:85-125. <https://doi.org/10.1007/s10482-013-0095-y>
28. Patten C.L., Glick B.R. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and Environmental Microbiology*. 2002;68(8):3795-3801. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>
29. Tao Y., Ferrer J.L., Ljung K., Pojer F., Hong F., Long J.A., Li L., Moreno J.E., Bowman M.E., Ivans, L.J. et al. Rapid synthesis of auxin via a new tryptophan-dependent pathway is required for shade avoidance in plants. *Cell*. 2008;133(1):164-176. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2008.01.049>
30. Glass N.L., Kosuge T. Cloning of the gene for indoleacetic acid-lysine synthetase from *Pseudomonas syringae* subsp. *savastanoi*. *Journal of Bacteriology*. 1986;166(2):598-603. <https://doi.org/10.1128/jb.166.2.598-603.1986>
31. Chistyakov V.A., Gorovtsov A.V., Usatov A.V., Prazdnova E.V., Mazanko M.S., Bren A.B., Usatova O.A., Vasilchenko N.G. *Strains for biological protection of agricultural crops from fusarium*. Patent No. 2724464 RF. Claimed 2nd December 2019; Published 23th June 2020. (In Russ.).
32. Mikhailova N.N., Eliseeva L.V. Application of microbiological fertilizers “Azotovit” and “Phosphatovit” in pea cultivation. *Scientific, educational and applied aspects of production and processing of agricultural products*. Collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference. Cheboksary: Chuvash State Agrarian University; 2022:171-176. (In Russ.).
33. Rezanova G. I., Ivanchenko T. V. Influence of microbiological fertilizers Azotovit and Phosphatovit on the development and productivity of grain crops. *Scientific and Agronomic Journal*. 2012;(1):15-21. (In Russ.). EDN: WDHXYP.
34. Schwyn B., Neilands J.B. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical Biochemistry*. 1987;160(1):47-56. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90612-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9)
35. Nautiyal C.S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*. 1999;170(1):265-270. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x>
36. Park J. H., Bolan N., Megharaj M., Naidu R. Isolation of phosphate solubilizing bacteria and their potential for lead immobilization in soil. *J. of Hazardous Materials*. 2011;185(2-3):829-836. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.095>
37. Behera B.C., Singdevsachan S.K., Mishra R.R., Dutta S.K., Thatoi H.N. Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove - a review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2014;3(2):97-110. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.008>
38. Chen Y.P., Rekha P.D., Arun A.B., Shen F.T., Lai W.-A., Young C.C. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*. 2006;34(1):33-41. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.12.002>
39. Birmole R., Kazi N. A study on the optimization of phosphate solubilizing potential of bacteria and their effect on plant growth when applied individually and in a consortium. *J. of Advanced Scientific Research*. 2020;11(S6):69-79.
40. Khatoon N., Khan M. Evaluation of *Bacillus subtilis* MRB4, as plant growth promoter and potential phosphate solubilizer under abiotic stress. *J. of Appl. Biology and Biotechnology*. 2020;8(5):27-35. <https://doi.org/10.7324/JABB.2020.80504>
41. Kunwar V.S., Chimouriya S., Lamichhane J., Gauchan D.P. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from rhizosphere of coffee plant and evaluating their effects on growth and development of coffee seedlings. *Biotechnol Ind J*. 2018;14(5):173.
42. Surovy M.Z., Gupta D.R., Rahman M.M., Akanda M.A. M., Islam M.T. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from traditional rice cultivar of Bangladesh and their effects on rice. *Annals of Bangladesh Agriculture*. 2017;21(1-2):27-37.
43. Li K., Van Zeghbroeck J., Liu Q., Zhang S. Isolating and characterizing phosphorus solubilizing bacteria from rhizospheres of native plants grown in calcareous soils. *Frontiers in Environmental Science*. 2021;9:802563. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.802563>

44. Yu X., Ai C., Xin L., Zhou G. The siderophore-producing bacterium, *Bacillus subtilis* CAS15, has a bio-control effect on *Fusarium* wilt and promotes the growth of pepper. *European J. of Soil Biology*. 2011;47(2):138-145. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.11.001>
45. Wahyudi A.T., Astuti R.P., Widayawati A., Meryandini A., Nawangsih A.A. Characterization of *Bacillus* sp. strains isolated from rhizosphere of soybean plants for their use as potential plant growth for promoting rhizobacteria. *J. Microbiol. Antimicrob.* 2011;3(2):34-40.
46. Zhang Y., Ren J., Wang W., Chen B., Li E., Chen S. Siderophore and indolic acid production by *Paenibacillus triticisoli* BJ-18 and their plant growth-promoting and antimicrobe abilities. *Peer J.* 2020;8:e9403. <https://doi.org/10.7717/peerj.9403>
47. Meena V.S., Maurya B.R., Meena S.K., Meena R.K., Kumar A., Verma J.P., Singh N.P. Can *Bacillus* species enhance nutrient availability in agricultural soils? *Bacilli and Agrobiotechnology*. Springer, 2016:367-395. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3_16
48. Ozdal M., Özdal Ö., Sezen A., Algur Ö. Biosynthesis of indole-3-acetic acid by *Bacillus cereus* immobilized cells. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2016;37(3):212-222.
49. Wagi S., Ahmed A. *Bacillus* spp.: potent microfactories of bacterial IAA. *Peer J.* 2019;7:e7258. <https://doi.org/10.7717/peerj.7258>

Информация об авторах

Никита Геннадьевич Васильченко – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.
Камилла Витальевна Механцева – магистрант, МФТИ; лаборант-исследователь, лаборатория новых биопрепаратов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, ЮФУ.
Фёдор Дмитриевич Иванов – младший научный сотрудник, фронтальная лаборатория биоинженерии.
Елизавета Петровна Пуликова – младший научный сотрудник, фронтальная лаборатория биоинженерии.
Владимир Анатольевич Чистяков – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, лаборатория здоровья почв, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, ЮФУ; главный научный сотрудник, Центр агробиотехнологии, ДГТУ.
Александр Вячеславович Усатов – доктор биологических наук, профессор кафедры генетики, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.
Анжелика Борисовна Брень – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Центр агробиотехнологии, ДГТУ; старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория экспериментального мутагенеза, ЮФУ.
Дмитрий Владимирович Рудой – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Центр агробиотехнологии.

Information about the authors

Nikita G. Vasilchenko – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.
Kamilla V. Mekhantseva – Master's Student, IPT; Research Lab Assistant, Laboratory of New Biopreparations, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, SFedU.
Fyodor D. Ivanov – Junior Researcher, Frontier Laboratory of Bioengineering.
Elizaveta P. Pulikova – Junior Researcher, Frontier Laboratory of Bioengineering.
Vladimir A. Chistyakov – Doctor of Science (Biology), Main Researcher, Laboratory of Soil Health, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, SFedU; Main Researcher, Center for Agrobiotechnology, DSTU.
Aleksandr V. Usatov – Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Genetics, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.
Anzhelika B. Bren – Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Center for Agrobiotechnology, DSTU; Senior Researcher, Research Laboratory of Experimental Mutagenesis, SFedU.
Dmitry V. Rudoy – Doctor of Science (Technical), Leading Researcher, Center for Agrobiotechnology, DSTU.

Статья поступила в редакцию 25.11.2024; одобрена после рецензирования 24.12.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 25.11.2024; approved after reviewing 24.12.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 581.4:582.572.8(470.47)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-119-125>

ВЗАИМОСВЯЗЬ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ РАСТЕНИЙ В ПОЛИХРОМНЫХ ПОПУЛЯЦИЯХ *TULIPA SUAVEOLENS* ROTH (LILIACEAE)

**Нина Цереновна Лиджиева¹, Наталья Тухтаровна Онкорова²,
Гилян Даниловна Бадмаева³, Екатерина Мартовна Мачкаева⁴**

^{1, 2, 3, 4} Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, Элиста, Республика Калмыкия, Россия

¹ for-lidjieva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2668-698X>

² machkaewa-nt5@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2517-7729>

³ gilyana_badmaeva@mail.ru

⁴ kate.machkaeva@mail.ru

Аннотация. Рассматривается взаимосвязь между морфологическими признаками растений в полихромных ценопопуляциях (ЦП) *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae). Три ЦП вида, приуроченные к разным растительным сообществам, исследованы в 2021 и 2022 гг. в период активного роста растений. В трех полихромных ЦП *T. suaveolens* выявлено последовательное уменьшение частоты встречаемости растений с различной окраской околоцветника (красная, желтая, розовая или оранжевая, белоцветковая). У растений вида *T. suaveolens* с окраской околоцветника, отличающейся от типичной (красная), наблюдалось ослабление корреляции между признаками. В условиях года с пониженным количеством осадков происходит усиление взаимосвязи между морфологическими признаками *T. suaveolens*, особенно у растений с окраской листочков околоцветника, отличной от красной.

Ключевые слова: *Tulipa suaveolens*, ценопопуляция, окраска листочков околоцветника, корреляция признаков

Для цитирования: Лиджиева Н.Ц., Онкорова Н.Т., Бадмаева Г.Д., Мачкаева Е.М. Взаимосвязи морфологических признаков растений в полихромных популяциях *Tulipa Suaveolens* Roth (Liliaceae) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 119–125. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-119-125>

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 23-24-10012.

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

Original article

INTERRELATIONSHIP OF MORPHOLOGICAL CHARACTERS OF PLANTS IN POLYCHROME POPULATIONS OF *TULIPA SUAVEOLENS* ROTH (LILIACEAE)

Nina Ts. Lidzhieva¹, Natalia T. Onkorova², Gilyan D. Badmaeva³, Ekaterina M. Machkaeva⁴

^{1, 2, 3, 4} Kalmyk State University, Elista, Republic of Kalmykia, Russia

¹ for-lidjieva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2668-698X>

² machkaewa-nt5@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2517-7729>

³ gilyana_badmaeva@mail.ru

⁴ kate.machkaeva@mail.ru

Abstract. The relationship between morphological traits of plants in polychrome coenopopulations (CP) of *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae) is considered. Three CP of the species, confined to different plant communities, were studied in 2021 and 2022 during the period of active plant growth. In three polychrome CP of *T. suaveolens*,

© Лиджиева Н.Ц., Онкорова Н.Т., Бадмаева Г.Д., Мачкаева Е.М., 2025

a consistent decrease in the frequency of occurrence of plants with different perianth colors (red; yellow, pink or orange, white-flowered) was revealed. In *T. suaveolens* plants with a perianth color different from the typical (red), a weakening of the correlation between the traits was observed. In the conditions of the year with reduced precipitation, there is an increase in the relationship between the morphological traits of *T. suaveolens*, especially in plants with a perianth color different from red.

Keywords: *Tulipa suaveolens*, ценопопуляция, окраска листочков околоцветника, корреляция признаков

For citation: Lidzhieva N.Ts., Onkorova N.T., Badmaeva G.D., Machkaeva E.M. Interrelationship of Morphological Characters of Plants in Polychrome Populations of *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2025;(1):119-125. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-119-125>

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant 23-24-10012.

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

Введение

Среди представителей рода *Tulipa*, произрастающих в Калмыкии, *Tulipa suaveolens* Roth имеет наиболее крупный и эффектный околоцветник, который особенно ярко выделяется в весенней степи. Это одна из причин, по которой вид становится объектом антропогенного воздействия [1]. Как редкий, уязвимый по статусу угрозы исчезновения вид включен в Красную книгу Республики Калмыкия и некоторых других регионов, а также в Красную книгу Российской Федерации [1–4].

Для определения мер охраны и воспроизводства редких видов необходимо изучать их биологию и экологию на разных уровнях организации, включая популяционный [5, 6]. В Калмыкии можно встретить два типа ценопопуляций (ЦП) *T. suaveolens* в зависимости от характера окраса околоцветника: монохромные, составленные растениями с красными цветками, и полихромные, которые включают не только красноцветковые формы, но и с листочками околоцветника других оттенков. Имеются исследования, в которых изучены географические особенности распределения растений *T. suaveolens* с разной окраской цветков в европейской части ареала вида [7]. Цель исследования – анализ взаимосвязи биоморфологических признаков растений в полихромных популяциях *Tulipa suaveolens* (Liliaceae). Растительные сообщества, в состав которых входят ЦП *T. suaveolens*, произрастают на Ергенинской возвышенности. Исследуемая территория в системе ботанико-географического районирования относится к Западно-Казахстанской степной провинции, подзоне полынно-типчаково-ковыльной пустынной степи [8].

Материал и методы

Объект исследования – три ЦП *T. suaveolens*, специфическая особенность которых – наличие растений с различной окраской цветка. Изучение данных ЦП осуществлено в вегетационные сезоны (2021, 2022 гг.) в разных частях Ергенинской возвышенности.

Растительные сообщества, к которым приурочены ЦП, описаны на основе доминантного подхода [9]. Расположена ЦП 1 в 8 км северо-западнее пос. Терячи Малодербетовского района в составе злаково-лерхопопынного (*Artemisia lerchiana* – *Poa ceta*) сообщества на светло-каштановых среднемощных солонцеватых суглинистых почвах. Географические координаты ЦП 1: N: 47°50'199"/E: 44°34'727". В злаково-прудняково-лерхопопынном (*Artemisia lerchiana* – *Kochia prostrata* – *Poa ceta*) сообществе в 10 км южнее пос. Обильное Сарпинского района на светло-каштановых среднемощных солонцеватых легкосуглинистых почвах произрастает ЦП 2. Географические координаты ЦП 2: N: 47°34'097" / E: 44°25'606"; ЦП 3 – часть разнотравно-злаково-прудняково-лерхопопынного (*Artemisia lerchiana* – *Kochia prostrata* – *Poa ceta* – *Mixteherbosa*) сообщества в 15 км севернее пос. Верхний Яшкуль Целинного района на светло-каштановых незасоленных среднесуглинистых почвах. Географические координаты ЦП 3: N: 46°39'530"/ E: 44°18'173".

Исследованные растительные сообщества занимали значительные по площади равнинные территории, в пределах которых могли встречаться понижения, сусликовины и другие небольшие неровности рельефа.

Частоту встречаемости особей (ω) с разной окраской цветка оценивали, используя популяционный подход [10]. Морфологические исследования растений включали в себя прижизненный учет и последующую статистическую обработку 12 морфологических признаков, мм (высота особи, длина и верхнего междоузлия, стрелки цветка, длина и ширина трех листьев организмов).

Для оценки популяционных значений признаков в наиболее типичных местах сообщества закладывали трансекты, включающие 10 последовательно расположенных участков $1,0 \times 1,0$ м². Для выявления характера взаимосвязи между признаками в каждой из трёх популяций случайным образом отбирали по 30 растений с определённым окрасом околоцветника. Корреляционный анализ проводили в пределах группы растений с данным окрасом околоцветника.

Наряду с типичным красным окрасом листочков околоцветника визуально выделялись также желтый, розовый, который включал вариации оттенков от бледно-розового до фиолетового, оранжевый и белый. Бихромные околоцветники относили к одному из морфотипов на основе преобладающего цвета.

Взаимосвязь между признаками определяли с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Уровень взаимосвязи между парами признаков оценивали по шкале Р.Э. Чеддока [11, 12].

Результаты и обсуждение

В популяциях *Tulipa suaveolens* частота встречаемости особей с конкретной окраской околоцветника была изменчива. В исследуемых многоцветных популяциях доминируют растения с красными цветками – это типичный окрас цветков растений *T. suaveolens*.

Частота красноцветковых особей изменялась от 65,0 в ЦП 1 в 2021 г. до 81,5 % в ЦП 3 в 2022 г. (табл. 1).

Таблица 1/Table 1

Частота встречаемости особей с разной окраской листочков околоцветника в ЦП *Tulipa suaveolens*, %/ The frequency of occurrence of individuals with different color of perianth leaflets in the cenopopulations of *Tulipa suaveolens*, %

Окраска околоцветника	Год	ЦП 1		ЦП 2		ЦП 3	
		%	S%	%	S%	%	S%
Красная	2021	64,8	3,02	71,2	2,86	76	2,70
	2022	74,0	2,77	78	2,62	81,6	2,45
Желтая	2021	21,6	2,60	20	2,53	11,2	1,99
	2022	16,0	2,32	10,8	1,96	10,4	1,93
Розовая	2021	8,4	1,75	4,4	1,30	6,4	1,55
	2022	6,0	1,50	3,6	1,18	5,6	1,45
Оранжевая	2021	4,4	1,30	4,4	1,30	4,8	1,35
	2022	3,6	1,18	6	1,50	2,0	0,89
Белая	2021	0,8	0,56	0	0,00	1,6	0,79
	2022	0,4	0,40	1,6	0,79	0,4	0,40

Примечание. S% – стандартная ошибка процента.

Среди особей, у которых окраска околоцветника отличается от основной, красной, наиболее часто отмечали особей с жёлтым оттенком околоцветника.

В 2021 г. доля растений с указанными типами окраски листочков околоцветника составила от 11,0 до 21,5 %, в 2022 г. – от 10,5 до 16,0 %. Растения с другими типами окраски листочков встречались значительно реже, чем жёлтые и красные. В ЦП 1 и 3 данные варианты окраски располагаются в порядке убывания частоты встречаемости: розовоцветковые, оранжевоцветковые и белоцветковые. В ЦП 2 по результатам 2022 г. растений с оранжевыми листочками околоцветника было больше, чем розовоцветковых.

В процессе продвижения от северной части Ергенинской возвышенности к ее центральной части, от ЦП 1 к ЦП 3, наблюдалось увеличение частоты встречаемости растений с красным окрасом околоцветника и, соответственно, уменьшение суммарной частоты встречаемости растений с другими окрасами. В первый год исследования межпопуляционные различия были особенно существенными. Разница между ЦП 1 и 3, наиболее удаленными друг от друга, в 2021 г. составила 11,2 % ($t_{diff} = 2,76$ при $P < 0,05$).

В ходе исследования выявлено, что в 2022 г. доля растений, имеющих красные цветки, во всех ЦП была выше, чем в 2021 г. Особенно существенными эти различия были в ЦП 1, расположенной в северной части Ергени. Они составили 9,2 % ($t_{diff} = 2,24$ при $P < 0,05$). В [13] описана полихромность цветков в ЦП *T. suaveolens*, произрастающей на одном из островов озера Маныч-Гудило. При этом предполагалось, что увеличение частоты встречаемости различных цветовых форм во времени связано с микроэволюционными процессами, происходящими под воздействием генетического дрейфа и изоляции в условиях острова.

Данное предположение подтверждается также тем, что ЦП *T. suaveolens*, которая находится на материке и отделена от островной популяции только водным пространством шириной около 3 км, является монохромной и состоит из растений с красными цветками. На Ергенинской возвышенности, где произрастают исследуемые ЦП, в частности в её северной и центральной частях, также можно предположить наличие изоляции ЦП. С северной стороны распространение ограничено высотой самой возвышенности, с южной – границей с Прикаспийской низменностью, которая здесь имеет непригодные для распространения *T. suaveolens* условия, особенно эдафические [14]. Однако если в островной ЦП *T. suaveolens* наблюдали тенденцию к возрастанию частоты «разноцветных» форм во времени, то в ЦП из растительных сообществ Ергенинской возвышенности в указанный период такой тенденции не выявлено. Установлено, что в 2022 г. доля растений с красными цветками во всех ЦП была больше, чем в 2021 г., соответственно, суммарная доля «разноцветных форм» была меньше. Особенно значимы эти различия для красноцветковых форм в ЦП 1, расположенной в северной части Ергени, – они составили 9,2 % ($t_{diff} = 2,24$ при $P < 0,05$).

Растения из трех исследованных ЦП *T. suaveolens* характеризовались следующими средними популяционными значениями признаков, мм: высота растений – 118,8–224,6, длина нижнего междоузлия – 17,6–23,1, длина второго междоузлия – 21,6–33,7, длина стрелки цветка – 44,0 – 115,9, длина листочка венчика – 27,2 – 49,3, ширина листочка венчика – 14,6–23,7, длина нижнего листа – 88,2–130,1, ширина нижнего листа – 19,2–26,9, длина среднего листа – 79,7–118,4, ширина среднего листа – 10,9–18,6, длина верхнего листа – 54,8–73,9, ширина верхнего листа – 7,7–12,5.

По полученным значениям коэффициента корреляции Пирсона для 144 пар проведен анализ уровня взаимосвязи пар признаков по шкале Р.Э. Чеддока [11]. В полихромных ЦП *T. suaveolens* отмечали 6 типов взаимосвязи по Чеддоку. Из них отрицательные умеренные ($r = -0,5 \dots -0,3$), слабые ($r < -0,3$), положительные слабые ($r < 0,3$), умеренные ($r = 0,3-0,5$), заметные ($r = 0,5-0,7$), высокие ($r = 0,7-0,9$), очень высокие ($r > 0,9$) (табл. 2).

Таблица 2/Table 2

Доля пар признаков с разными уровнями корреляций у особей *Tulipa suaveolens*, которые отличались по окраске листочков околоцветника, % / The proportion of pairs of characters with different levels of correlations in *Tulipa suaveolens* individuals, which differed in the color of the perianth leaflets, %

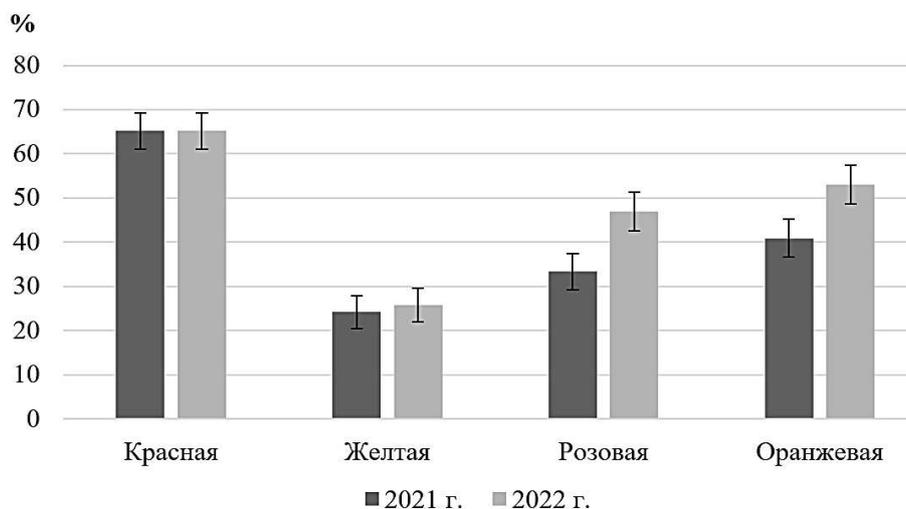
Окраска листочков околоцветника	Год	Коэффициент корреляции						
		-0,5... -0,3	< -0,3	< 0,3	0,3–0,5	0,5–0,7	0,7–0,9	> 0,9
Красная	2021	0,0	0,0	7,6	27,3	51,5	12,1	1,5
	2022	0,0	0,0	0,0	34,8	50,0	13,6	1,5
Желтая	2021	3,0	3,0	27,3	42,4	16,7	6,1	1,5
	2022	0,0	0,0	10,6	63,6	12,1	12,1	1,5
Розовая	2021	0,0	1,5	12,1	53,0	27,3	4,5	1,5
	2022	0,0	1,5	22,7	28,8	36,4	9,1	1,5
Оранжевая	2021	0,0	1,5	9,1	48,5	37,9	1,5	1,5
	2022	0,0	3,0	16,7	27,3	43,9	9,1	0,0

В исследованных ЦП *T. suaveolens* независимо от окраски околоцветника очень высокий уровень взаимосвязи имели высота растения и длина цветочной стрелки. Также тесно были связаны показатели длины и ширины всех листьев и листочков околоцветника.

У растений с красной окраской листочков околоцветника отмечали только положительные взаимосвязи, среди которых пары признаков с коэффициентом корреляции, превышающим значение 0,7, в первый год исследования составили 13,6, во второй год их было на 1,5 % больше. У растений с другими окрасками листочков околоцветника связи в парах признаков более ослаблены. В 2021 г. во всех группах цветных растений 1,5–6,0 % составляли пары с отрицательными взаимосвязями, в 2022 г. такой тип корреляций отмечали у растений с розовыми и оранжевыми листочками околоцветника.

По сравнению с красноцветковыми растениями доля пар признаков, обнаруживших значение коэффициента корреляции больше 0,5, была ниже у желтоцветковых растений в 2021 г. на 40,9 % ($t_{\text{diff}} = 7,33$ при $P < 0,001$), в 2022 г. – на 39,4 % ($t_{\text{diff}} = 7,00$ при $P < 0,01$); у розовоцветковых растений в 2021 г. – на 31,8 % ($t_{\text{diff}} = 5,45$ при $P < 0,001$), в 2022 г. – на 18,2 % ($t_{\text{diff}} = 3,03$ при $P < 0,01$); у оранжевоцветковых растений в 2021 г. – на 24,2 % ($t_{\text{diff}} = 3,17$ при $P < 0,01$), в 2022 г. – на 12,1 % ($t_{\text{diff}} = 2,02$ при $P < 0,05$) (рисунок).

При сравнении доли пар признаков с высоким и очень высоким уровнями взаимосвязи ($r > 0,7$) эта тенденция сохранялась. Особенно значимы были различия красноцветковых с розовоцветковыми – 7,6 ($t_{\text{diff}} = 2,08$ при $P < 0,05$) и с оранжевоцветковыми – 10,6 % ($t_{\text{diff}} = 3,17$ при $P < 0,01$) в первый год исследования. Результаты проведенного анализа изменчивости и скоррелированности 12 морфологических признаков согласуются с нашим предположением о выщеплении форм с окраской, отличающейся от типичной красной, в исследуемых популяциях как следствии генетических процессов в изолированных популяциях.



Доля пар признаков у растений *Tulipa suaveolens* с разной окраской листочков околоцветника, имеющих значение коэффициента корреляции больше 0,5, % / The proportion of pairs of signs in *Tulipa suaveolens* plants with different colors of perianth leaflets having a correlation coefficient value greater than 0.5, %

Период активной вегетации растений *T. suaveolens* приходится на два весенних месяца – март и апрель. Средняя температура этих двух месяцев в годы исследования несколько выше – на 0,30–0,75 °С, в то время как суммарный объем осадков за эти два месяца в 2021 г. был на 66,9–107,0 мм больше (табл. 3).

Такая динамика осадков в весенний период в годы исследования отразилась на характере взаимосвязи признаков у растений *T. suaveolens*, различающихся по окраске околоцветника. Выявлено, что при уменьшении суммарного объема осадков за два весенних месяца, на которые приходится вегетация вида, происходит существенное возрастание взаимосвязи между признаками, особенно у форм, отличающихся по окраске от типичных для вида красноцветковых. Доля пар признаков с коэффициентом корреляции больше 0,5 у желтоцветковых растений в 2022 г. больше, чем в 2021 г., на 1,5 %; у розовоцветковых – на 13,6 ($t_{\text{diff}} = 2,28$ при $P < 0,05$); у оранжевоцветковых – на 12,1 % ($t_{\text{diff}} = 1,98$ при $P < 0,05$).

Таблица 3/Table 3

Средняя температура воздуха и сумма выпавших осадков в марте и апреле в местах произрастания ценопопуляций *T. suaveolens* / The average air temperature and the amount of precipitation in March and April in the growing areas of *T. suaveolens* cenopopulations

Ближайшая метеостанция	ЦП	Температура, °С		Сумма осадков, мм	
		2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Малые Дербеты	1, 2	5,95	6,7	121,6	14,6
Элиста	3	5,75	6,05	105,1	38,2

Выводы

В трех исследованных полихромных ЦП *T. suaveolens* выявлено последовательное уменьшение частоты встречаемости растений с различной окраской околоцветника.

У растений вида *T. suaveolens*, окраска околоцветника которых отличается от типичной красной, наблюдалось ослабление корреляции между признаками.

В условиях года с пониженным количеством осадков происходит усиление взаимосвязи между морфологическими признаками *T. suaveolens*, особенно у растений с окраской листочков околоцветника, отличной от красной.

Список источников

1. Красная книга Республики Калмыкия. Т. 2: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения растения и грибы. Элиста: Джангар, 2014. 199 с.
2. Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы. Краснодар: Администрация Краснодарского края, 2017. 850 с.
3. Красная книга Ставропольского края. Т. I: Растения. Ставрополь: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Ставропольского края, 2013. 399 с.
4. Об утверждении Перечня объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации: Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 23.05.2023 № 320. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202307210008?ysclid=m87tjrwfy369289822> (дата обращения: 11.08.2024).
5. Работнов Т.А. Вопросы изучения состава популяций для целей фитоценологии // Проблемы ботаники. 1950. Т. 1. С. 465–483.
6. Уранов А.А. Возрастной спектр фитоценопопуляций как функция времени и энергетических волновых процессов // Биол. наука. 1975. № 2. С. 7–34.
7. Кашин А.С., Крицкая Т.А., Кондратьева А.О., Петрова Н.А., Шилова И.В., Пархоменко А.С., Муртазаев Р.А. Географические особенности распределения растений *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae, Magnoliophyta) по окраске цветка в европейской части ареала // Поволжский экол. журн 2022. № 2. С. 150–172. EDN: WDYQOL. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-2-150-172>
8. Карта растительности Европейской части СССР. М 1: 2 500 000 / отв. ред. Т.И. Исаченко, В.М. Лавренко. Л.: АН СССР, Бот. ин-т им. В.Л. Комарова, 1980.
9. Александрова В.Д. Классификация растительности: обзор принципов классификации и классификационных систем в разных геоботанических школах. Л.: Наука, 275 с.
10. Ценопопуляции растений (основные понятия и структура) / отв. ред. А.А. Уранов, Т.И. Серебрякова. М.: Наука, 1976. 217 с.
11. Chaddock R.E. Principles and methods of statistics. Boston: Houghton Mifflin, 1925. 471 p.
12. Терентьев П.В., Ростова Н.С. Практикум по биометрии. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 152 с.
13. Лью Т.Н., Лиджиева Н.Ц., Лиджигоряева Ц.В. Зависимость изменчивости морфологических признаков растений от окраски околоцветника в ценопопуляции *Tulipa gesneriana* // Научная мысль Кавказа 2015. № 4. С. 119–123. EDN: VJPACH. <https://doi.org/10.18522/2072-0181-2015-84-4-119-123>
14. Федюков А.М. Природа Калмыцкой АССР. Элиста, 1969. 133 с.

References

1. *The Red Book of the Republic of Kalmykia. Vol. 2. Rare and endangered plants and fungi.* Elista: Dzhangar; 2014. 199 p. (In Russ.).

2. *The Red Book of the Krasnodar Territory. Plants and fungi*. Krasnodar: Administration of the Krasnodar Territory; 2017. 850 p. (In Russ.).
3. *The Red Book of the Stavropol Territory*. Vol. I. Plants. Stavropol: Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Stavropol Territory; 2013. 399 p. (In Russ.).
4. *On Approval of the List of flora listed in the Red Book of the Russian Federation*: Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated 23th May 2023 No. 320. Available from: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202307210008?ysclid=m87tjrwyfy369289822> [Accessed 11th August 2024]. (In Russ.).
5. Rabotnov T.A. Questions of studying the composition of populations for the purposes of phytocenology. *Problems of Botany*. 1950;1:465-483. (In Russ.).
6. Uranov A.A. The age spectrum of phytocenopopulations as a function of time and energy wave processes. *Biological Science*. 1975;(2):7-34. (In Russ.).
7. Kashin A. S., Kritskaya T. A., Kondratieva A. O., Petrova N. A., Shilova I. V., Parkhomenko A. S., Murtagaliev R. A. Geographical features of the distribution of *Tulipa suaveolens* Roth (Liliaceae, Magnoliophyta) plants by flower color in the European part of the range. *Volga J. of Ecology*. 2022;(2):150-172. (In Russ.). EDN: WDYQOL. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-2-150-172>
8. Isachenko T.I., Lavrenko V.M., eds. *Vegetation map of the European part of the USSR*. Scale 1: 2 500 000. Leningrad: USSR Academy of Sciences, Komarov Botanical Institute; 1980. (In Russ.).
9. Alexandrova V.D. *Vegetation classification: an overview of the principles of classification and classification systems in different geobotanical schools*. Leningrad: Science; 1969. 275 p. (In Russ.).
10. Uranov A.A., Serebryakova T.I., eds. *Coenopopulations of plants (basic concepts and structure)*. Moscow: Science; 1976. 217 p. (In Russ.).
11. Chaddock R.E. *Principles and methods of statistics*. Boston: Houghton Mifflin; 471 p.
12. Terentyev P. V., Rostova N.S. *A workshop on biometrics*. Leningrad: Publishing House of the Leningrad University; 1977. 152 p. (In Russ.).
13. Lyu T.N., Lidzhiyeva N.C., Lidzhigoryaeva C.V. Dependence of the variability of morphological characteristics of plants on the color of the perianth in the cenopopulation of *Tulipa gesneriana*. *Scientific Thought of the Caucasus*. 2015;(4):119-123. (In Russ.). EDN: VJPACH. <https://doi.org/10.18522/2072-0181-2015-84-4-119-123>
14. Fedyukov A.M. *The nature of the Kalmyk ASSR*. Elista, 1969. 133 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Н.Ц. Лиджиева – доктор биологических наук, профессор.

Н.Т. Онкорова – кандидат биологических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой.

Г.Д. Бадмаева – аспирант.

Е.М. Мачкаева – магистрант.

Information about the authors

N.Ts. Lidzhiyeva – Doctor of Science (Biology), Professor.

N.T. Onkorova – Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Acting Head of Department.

G.D. Badmaeva – Postgraduate Student.

E.M. Machkaeva – Master's Degree Student.

Статья поступила в редакцию 20.11.2024; одобрена после рецензирования 24.12.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 20.11.2024; approved after reviewing 24.12.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья

УДК 582.26/27(571.16)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-126-132>

СТРУКТУРА ВОДОРΟΣЛЕВЫХ СООБЩЕСТВ И ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕКИ ИЙ-ХЕМ (РЕСПУБЛИКА ТЫВА, РОССИЯ)

Ю.В. Науменко¹, Ч.Д. Назын², Е.С. Кашкак³✉, У.В. Ондар⁴, У.С. Ооржак⁵

¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр биосферных исследований, Кызыл, Республика Тыва, Россия

^{3, 4, 5}Тувинский государственный университет, Кызыл, Республика Тыва, Россия

¹Naumenko-y55@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2221-8548>

²nazynch@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8177-921X>

³klslena@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-9021-8024>

⁴nirs.tgu.tuva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2519-4043>

⁵oorzhakus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5424-8824>

Аннотация. Приведены сведения о водорослях и гидрохимическом составе р. Ий-Хем, протекающей в Тоджинской котловине Республики Тыва. Воды гидрокарбонатного класса группы кальция, по соотношению ионов – пресные, мягкие. Видовой состав водорослей представлен 167 видами и внутривидовыми таксонами из 7 отделов: Cyanoprokaryota – 13, Chrysophyta – 3, Bacillariophyta – 123, Dinophyta – 1, Rhodophyta – 1, Chlorophyta – 19, Charophyta – 7. Диатомовые водоросли (73,6 %) преобладают по таксономическому разнообразию и количественному развитию, им уступают зеленые (11,4 %), синезеленые (7,8 %). Харовитовые, динофитовые, золотистые и красные водоросли суммарно составляют 7,2 %. Выявлено 12 доминантов, из которых выделяются особо *Ulnaria ulna*, *Didymosphenia geminata*, *Cymbella stuxbergii*. Также проведен эколого-географический анализ, из которого следует, что альгофлора представлена бентосными видами с преобладанием индифферентов по отношению к активной реакции среды и галобности. В водотоке определено 137 таксонов – индикаторов сапробности. В географическом отношении преобладают космополиты и бореальные виды.

Ключевые слова: Республика Тыва, река Ий-Хем, гидрохимический состав, водоросли, таксономический состав, Cyanoprokaryota, Bacillariophyta

Для цитирования: Науменко Ю.В., Назын Ч.Д., Кашкак Е.С., Ондар У.В., Ооржак У.С. Структура водорослевых сообществ и гидрохимическая характеристика реки Ий-Хем (Республика Тыва, Россия) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 126–132. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-126-132>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-10026.

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

Original article

STRUCTURE OF ALGAE COMMUNITIES AND HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE IY-HEM RIVER (REPUBLIC OF TYVA, RUSSIA)

Yu. V. Naumenko¹, Ch.D. Nazyn², E.S. Kashkak³, U.V. Ondar⁴, U.S. Oorzhak⁵

¹Central Siberian Botanical Garden of Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Center of Biosphere Research, Kyzyl, Republic of Tyva, Russia

^{3, 4, 5}Tuvan State University, Kyzyl, Republic of Tyva, Russia

¹Naumenko-y55@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2221-8548>

²nazynch@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8177-921X>

³klslena@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-9021-8024>

⁴nirs.tgu.tuva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2519-4043>

⁵oorzhakus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5424-8824>

© Науменко Ю.В., Назын Ч.Д., Кашкак Е.С., Ондар У.В., Ооржак У.С., 2025

Abstract. Information is provided on algae and the hydrochemical composition of the Yi-Hem River flowing in the Todzhinskaya basin of the Republic of Tyva. The waters of the bicarbonate class, the calcium group, are fresh and soft in terms of the ratio of ions. The species composition of algae is represented by 167 species and intraspecific taxa from 7 departments: Cyanoprokaryota - 13, Chrysophyta - 3, Bacillariophyta - 123, Dinophyta - 1, Rhodophyta - 1, Chlorophyta - 19, Charophyta - 7. 12 dominants were identified, of which *Ulnaria ulna*, *Didymosphenia geminata*, *Cymbella stuxbergii* stand out. An ecological and geographical analysis has been carried out, from which it follows that algoflora is represented by benthic species with a predominance of indifferent in relation to the active reaction of the environment and halobicity. 137 taxa of saprobity indicators have been identified in the watercourse. Geographically, cosmopolitan and boreal species prevailed.

Keywords: Republic of Tyva, Yi-Hem river, hydrochemical composition, algae, taxonomic composition, Cyanoprokaryota, Bacillariophyta

For citation: Naumenko Yu.V., Nazyn Ch.D., Kashkak E.S., Ondar U.V., Oorzhak U.S. Structure of Algae Communities and Hydrochemical Characteristics of the River Iy-Hem River (Republic of Tyva, Russia). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):126-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-126-132>

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-24-10026.

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

Введение

Гидрографическая сеть Республики Тыва в основном относится к верхней части бассейна Енисея, крупнейшей реки России и мира. Главной водной артерией республики является Верхний Енисей (Улуг-Хем) с двумя составляющими: Бий-Хем и Каа-Хем. Бассейн р. Бий-Хем находится в наиболее влажной, таежной части Тувы. В центре его лежит Тоджинская котловина, которая изобилует большим количеством рек. В альгологическом отношении водотоки практически не изучены, известна одна работа [1]. Они являются эталонными, так как антропогенная нагрузка на реки незначительна.

Цель работы – выявить таксономическую и экологическую структуру водорослевых сообществ и дать гидрохимическую характеристику реки Ий-Хем.

Материалы и методы

Объект исследования – альгофлора и физико-химические параметры реки Ий-Хем (Тоджинский район Республики Тыва). Данный водоток – правый приток Бий-Хема (Большой Енисей) длиной 108 км. Он берет начало из оз. Нойон-Холь и в верхнем течении представляет собой цепочку Олбрукских озер. В среднем и нижнем течении – это извилистая река, где ширина колеблется от 1 до 20 м, русло сложено из камня, гальки и песка со множеством небольших перекатов, скорость течения в период межени в среднем достигает 1,0 м/с. Площадь водосбора – 1390 км², среднегодовой расход – 10–15 м³/с [2].

Для альгологических исследований взято 40 проб планктона и бентоса в летний сезон 2022, 2023 гг. На физико-химический анализ воды пробы отбирали в августе 2019 г. Анализ исследуемых вод проведен сразу после отбора проб по общепринятым методикам, согласно нормативным документам, в лаборатории физико-химических методов исследования Тувинского государственного университета.

Водоросли изучали с помощью светового микроскопа Amplival Carl Zeiss Jena при увеличении от 640 до 1600 раз. В работе принята система диатомовых водорослей [3]. Обработку проводили по общепринятой методике альгологических исследований [4]. При идентификации таксонов использовались зарубежные таксономические и флористические сводки [5, 6]. Номенклатурные комбинации ряда видов соответствуют приводимым в электронной базе данных [7], сведения об экологии и распространении видов получены из [8].

Результаты исследования

Вода реки без вкуса и запаха, температура до 21 °С, нейтральная реакция (7,4±0,2); по цветности (24,68 град.) и мутности (1,05 ЕМФ) относится к прозрачным. По величине общей жесткости вода водотока мягкая (3,26±0,29), главенствующую роль играют ионы Ca²⁺ и Mg²⁺ (46,94 и 11,16 мг/дм³ соответственно). В анионном составе преобладают гидрокарбонаты (157,73 мг/дм³), хлориды (36,05 мг/дм³), сульфаты (9,03 мг/дм³). Содержание нитратов невелико – 1,41 мг/дм³, нитриты не обнаружены.

Видовой состав водорослей представлен 167 видовыми и внутривидовыми таксонами, относящимися к 69 родам и 40 семействам из 7 отделов. По числу таксонов преобладают диатомовые – 73,6 %, им уступают зеленые – 11,4 %, разнообразно представлены синезеленые – 7,8 %. Беден состав харовитовых, динофитовых, золотистых и красных водорослей, которые в сумме составляют 7,2 %.

Более половины списка определенных видов (73,6 %) приходится на отдел диатомовых водорослей *Bacillariophyta*. Богатство его определяют представители классов *Bacillariophyceae* (86 таксонов) и *Fragilariophyceae* (33). Из класса *Centrophyceae* выявлено 4 вида (*Cyclotella comta* (Ehr.) Kütz., *C. meneghiniana* Kütz., *Melosira varians* Ag. и *M. undulata* (Ehr.) Kütz.), относящихся к семействам *Stephanodiscaceae* и *Melosiraceae*. Класс *Fragilariophyceae* представлен тремя семействами и 9 родами. Представители класса *Bacillariophyceae* относятся к 31 роду и 16 семействам. Диатомовые преобладают по таксономическому разнообразию и количественному развитию.

Второе место принадлежит видам из отдела зеленых *Chlorophyta* (19), которые относятся к двум классам: *Chlorophyceae* (17) и *Ulvophyceae* (2) и распределяются по 8 семействам и 14 родам. Если представители 1-го класса встречались на протяжении всей реки, то виды из 2-го класса *Ulothrix zonata* (Web. et Mohr) Kütz. и *Cladophora glomerata* (L) Kütz. – только в среднем и нижнем течении.

Третье место по разнообразию занимают синезеленые водоросли (*Cyanoprokaryota*), представленные классом *Cyanophyceae* (13 видов), относящиеся к 6 семействам и 8 родам. Из представителей данного отдела чаще других встречаются виды родов *Oscillatoria* и *Phormidium*.

Из отдела *Chrysophyta* выявлены 3 вида (*Dinobryon divergens* Imh., *D. sertularia* Ehr., *Hydrurus foetidus* (Vill.) Kirchn.), принадлежащих к двум семействам и двум родам.

По одному виду обнаружены организмы из отделов динофитовых (*Ceratium hirundinella* (O.F.M.) Bergh) и красных водорослей (*Audouinella chalybea* (Roth) Bory).

В реке определено 40 семейств. Из них 9 наиболее крупных принадлежат отделам диатомовых, зеленых и харовитовых: *Cymbellaceae* (23 вида), *Fragilariaceae* (18), *Ulnariaceae* (13), *Gomphonemataceae* (10), *Scenedesmaceae* (9), *Achnanthidiaceae*, *Rhopalodiaceae*, *Surirellaceae* и *Closteriaceae* (по 7). Данные семейства включают 101 таксон, что составляет 60,8 % от всего состава. Семейства, господствующие в альгофлоре, играют главную роль в структуре альгоценозов, на остальные (31) приходится 66 таксонов, из которых 12 семейств представлены 2 видами, к одновидовым относятся 14 семейств.

В р. Ий-Хем выявлено 69 родов, 7 ведущих включают 31,7 % всех определенных видов. Шесть из них относятся к диатомеям и один к харовитовым: *Cymbella*, *Gomphonema* (по 10 видов), *Ulnaria* (9), *Closterium* и *Epithemia* (по 7), *Fragilaria* и *Pinnularia* (по 5 видов). Двенадцать родов являются двувидовыми, 35 – одновидовыми.

В систематическом отношении сообщества р. Ий-Хем достаточно разнообразны. Общими для всех группировок были таксоны (41): 2 из отдела синезеленых, 6 из зеленых и 33 из отдела диатомовых. За период исследования выявлено 12 доминантов: 7 – из отдела *Bacillariophyta* *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère, *Cymbella stuxbergii* (Cleve) Cleve, *Encyonema ventricosum* (C. Ag.) Grun., *Didymosphenia geminata* (Lyngb.) M. Schmidt, *Diatoma mesodon* Kütz., *Cocconeis placentula* Ehr., *C. euglypta* Ehr. – из *Chrysophyta* (*Dinobryon divergens*), 3 – из *Chlorophyta* (*Stigeoclonium tenue* (Ag.) Kütz., *Ulothrix zonata*, *Cladophora glomerata*), один – из *Cyanoprokaryota* (*Nostoc caeruleum* Lyngbye ex Bornet & Flahault).

Фитопланктон представлен всеми отделами водорослей, выявленных в реке, кроме красных. Он слабо развит, всего 52 вида водорослей. Преобладающая часть относится к отделу диатомей. Доминировали *Ulnaria ulna*, *Didymosphenia geminata*, *Cymbella stuxbergii*, *Dinobryon divergens*,

только в нижнем течении зафиксирована интенсивная вспышка *Nostoc caeruleum*. В значительном количестве отмечали развитие *Fragilaria crotonensis* Kitt., *Ceratium hirundinella*. Большая часть диатомовых в планктоне – донные и перифитонные формы: *Rhoicosphenia abbreviata* (C.Ag.) Lange-Bertalot, *Staurosira leptostauron* (Ehr.) Kulikovskiy et Genkal, *Gomphonema olivaceum* (Hornemann) Rabenhorst и др.

Группировка фитоперифитона – самая разнообразная, в ней 119 видовых и внутривидовых таксонов водорослей. Число в пробах изменялось от 16 до 32 видов. Доминировали большей частью диатомовые. В обрастаниях камней отмечено наибольшее число видов – 32. Господствовали *Didymosphenia geminata*, *Cymbella stuxbergii* и *Ulnaria ulna*. На быстринках в среднем течении найдены *Hydrurus foetidus* и *Audouinella chalybea*. В ряде случаев на перекатах фиксировали интенсивную вегетацию *Stigeoclonium tenue* и *Ulothrix zonata*. Часто встречались виды *Cymbella cistula* (Ehr.) Kirchner, *C. cymbiformis* (Ag.? Kütz.) V. H., *Cymbopleura naviculiformis* (Auersw. ex Heiberg) Krammer, *Gomphonema parvulum* (Kütz.) Kütz., *G. ventricosum* Greg.

В выжимках мха число видов варьировало от 14 до 24, доминанты те же, что и на камнях. Наиболее часто встречались *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz., *T. flocculosa* (Roth) Kütz., *Navicula radiosa* Kütz. Таксоны рода *Closterium* представлены здесь наиболее разнообразно в отличие от других биотопов (виды *Closterium acerosum* (Schrank) Ehr., *C. leibleinii* Kütz., *C. littorale* Gay, *C. moniliferum* (Bory) Ehr., *C. parvulum* Naeg).

Наименьшее число видов в пробах (от 12 до 20) зарегистрировано на древесном субстрате. Преобладают те же, что господствовали на камнях и в выжимках мха, сопутствовали *Epithemia argus* (Ehr.) Kütz., *Meridion circulare* Ag., *Stauroneis anceps* Ehr., *Encyonema ventricosum* и др.

Менее разнообразны грунты реки (97 видов). На глубине 10–25 см – буро-черный наилкок, где доминировали *Didymosphenia geminata*, *Cocconeis placentula* Ehr., *C. euglypta* Ehr. В значительном количестве вегетировали *Melosira varians*, *Ulnaria ulna*, *Gyrosigma acuminatum* (Kütz.) Rabenh., *Epithemia gibba* (Ehr.) Kütz., *E. parallela* (Grunow) Ruck & Nakov и др.

На песчаных грунтах на глубине 15 см доминанты – *Didymosphenia geminata*, *Ulnaria ulna* и *Diatoma mesodon*. Интенсивно развивались *Achnanthydium minutissima* (Kütz.) Czarnecki, *A. affine* (Grunow) Czarnecki, *A. lineare* W. Sm. и *Planothidium lanceolatum* (Bréb.) Lange-Bertalot. В небольших заливчиках отмечены заросли *Cladophora glomerata*, нити которой облеплены видами рода *Cocconeis*.

Эколого-географическая характеристика водорослей р. Ий-Хем. Сведения о приуроченности видов к определенным местообитаниям известны для 150 организмов, что составляет 89,8 % от общего числа видов. Большинство выявленных видов относится к бентосной группировке, из которой выделяются обрастатели (таблица). Преобладающими формами перифитона являются диатомеи, виды родов *Fragilariforma*, *Brebissonia*, *Encyonema*, *Planothidium* и др. Из донных водорослей – *Stigeoclonium tenue*, *Cumatopleura apiculate* W. Smith, *C. elliptica* (Bréb.) W. Sm., а также виды родов *Pinnularia*, *Navicula* и др. Меньше всех (33 вида) отмечено планктонных организмов: *Dinobryon sertularia*, *Fragilaria crotonensis*, *Ulnaria acus* (Kütz.) Aboal, *U. danica* (Kütz.) Compere et Bukhtiyarova, *Ankistrodesmus densus* Korsch., *Tetradesmus obliquus* (Turpin) M.J. Wynne и др.

Все выявленные виды по отношению к солености являются олигогалобами, причем 74,2 % составляют индифференты. Из галофобов наиболее массовы *Tabellaria fenestrata*, *T. flocculosa*, *Meridion circulare* и др. Галофилы составляли 9,6 %, из них часто встречались *Chroococcus turgidus* (Kütz.) Nägeli, *Oscillatoria limosa* C. Agardh ex Gomont, *Epithemia sorex* Kütz., *E. turgida* (Ehr.) Kütz. и др.

Среди индикаторов активной реакции среды преобладали индифференты – 50,3 %. Алкалофилы и ацидофилы составляли 28,7 и 7,2 % соответственно. Значительна группа алкалофилов, куда входили доминанты *Ulnaria ulna*, *Cocconeis placentula*, *Diatoma mesodon*, часто встречались *Rhoicosphenia abbreviata*, *Epithemia argus*, *Cumatopleura solea* (Bréb.) W. Sm. Из ацидофилов чаще других отмечали *Gomphonema acuminatum* Ehr., *Frustulia rhomboides* (Ehr.) D. T., *Dinobryon divergens* и др.

В биогеографическом отношении среди определенных организмов выделяются космополиты (46,7 %) и бореальные (33,5 %), количество которых значительно превышает число арктоальпийцев. Из последней группы следует отметить доминанты *Didymosphenia geminata*, *Diatoma mesodon*, *Cymbella stuxbergii*, часто на протяжении всей реки и во всех сообществах находили *Hannaea arcus* (Ehr.) R.M. Patrick, *Cymbella aspera* (Ehr.) Cl., *Pinnularia borealis* Ehr. и др.

Степень органического загрязнения воды оценивали по видам – индикаторам сапробности (137 таксонов). Определенные сапробионты относились ко всем группам сапробности, кроме полисапробной (таблица). Обитатели очень чистых (α -ксеносапробы) и высокосапробных (α -мезосапробы) вод – 7 и 6 видов соответственно. Показатели умеренного загрязнения (β -мезосапробы) – 52 вида. Развитие 54 видовых и внутривидовых таксонов, вегетирующих в очень чистых и чистых водах, ряд доминантов из этих зон, а также виды (α - β) мезосапробной зоны позволяют характеризовать воды р. Ий-Хем как благополучные, чистые.

Эколого-географическая характеристика водорослей р. Ий-Хем
/ Ecological and geographical characteristics of algae Yi-Hem River

Эколого-географическая группа	Число видов	% от выявленных видов
Местообитание		
Планктон	33	19,8
Обрастания	71	42,5
Дно	46	27,5
Таксон малоизученный	17	10,2
Отношение к NaCl (галобность)		
Галофоб	16	9,6
Индиферент	124	74,2
Галофил	16	9,6
Таксон малоизученный	11	6,6
Отношение к pH (ацидофильность)		
Ацидофил	12	7,2
Индиферент	84	50,3
Алкалифил	48	28,7
Таксон малоизученный	23	13,8
Географическая характеристика		
Космополит	78	46,7
Бореальный	56	33,5
Арктоальпийский	23	13,8
Таксон малоизученный	10	6,0
Сапробность		
Ксеносапроб	7	4,2
Ксеноолигосапроб	9	5,4
Олиго-ксеносапроб	3	1,8
Олигосапроб	35	20,9
Олиго- β -мезосапроб	17	10,2
β -олиго-мезосапроб	1	0,6
β -мезосапроб	52	31,2
V- α -мезосапроб	4	2,4
α - β -мезосапроб	3	1,8
α -мезосапроб	6	3,6
Таксон малоизученный	30	17,9

Обсуждение

Основу альгофлоры р. Ий-Хем составляют диатомеи (73,6 %), что свойственно голарктическим водным объектам [9, 10]. Выявлено 40 семейств. Из 9 крупных семейств 7 – представители отдела *Bacillariophyta*. Более половины семейств дву- и одновидовые, что свидетельствует о сложных процессах флорогенеза и значительной роли миграции.

В водотоке – 69 родов, из них 7 ведущих включают 31,7 % определенных таксонов. Двенадцать родов представлены двумя видами, 35 – одним. Рассмотрение семейственного и родового спектров показывает концентрацию видов в небольшом числе родов и семейств, что подтверждает представление об автохтонном развитии альгофлоры. На сложность флорогенетических процессов указывает большое количество маловидовых родов и семейств. Выявленные соотно-

шения характерны северным флорам [11]. Из 12 доминантов 7 – представители отдела диатомовых. Преобладание индифферентов по отношению к галобности вызвано небольшой концентрацией солей. Значительная доля ксено- и олигосапробионтных таксонов связана с незначительной концентрацией нитратов (1,41 мг/дм³).

Заключение

Воды реки Ий-Хем по гидрохимической классификации относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция. По соотношению ионов – пресные, мягкие. Определен состав водорослей, представленный 167 видовыми и внутривидовыми таксонами из 7 отделов: *Cyanoprokaryota* – 13, *Chrysophyta* – 3, *Bacillariophyta* – 123, *Dinophyta* – 1, *Rhodophyta* – 1, *Chlorophyta* – 19, *Charophyta* – 7. Доминанты характерны почти для всех биотопов (*Didymosphenia geminata*, *Ulnaria ulna*, *Cymbella stuxbergii*). Наиболее разнообразны водоросли в перифитонных группировках. Из бентосных форм преобладают обрастатели. Господствуют космополиты со значительной долей бореальных форм, индифференты по отношению к галобности (74,2 %) и активной реакции среды (50,3 %). Выявлено 137 индикаторных видов, из них 54 – ксеносапробы, олигосапробы, а также (о-β) мезосапробы. Это позволяет характеризовать воды р. Ий-Хем как чистые.

Список источников

1. Printz H. Contributiones ad floram Asiae interioris pertinentes. I. Die Chlorophyceen des südlichen Sibiriens und des Uriankailandes // *Kongelige Norske Videnskabernes Selskab Skrifter*. 1915. Vol. 4. P. 1–59.
2. Природные условия Тувинской автономной области // Тр. Тувинской комплексной экспедиции. М.: Изд-во АН СССР, 1957. Вып. 111. 275 с.
3. Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 803 с.
4. Водоросли: справочник / С.П. Вассер, Н.В. Кондратьева, Н.П. Масюк [и др.]. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
5. Krammer K. *Cymbella* // *Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland waters and comparable habitats*. H. Lange-Bertalot (ed.), A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2002. Vol. 3. 584 p.
6. Komarek J., Anagnostidis K. *Cyanoprokaryota. 2 Oscillatoriales* // *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. B. Büdel, L. Krienitz, G. Gärtner & M. Schagerl (eds.). München: Elsevier, 2005. Bd. (2). 759 p.
7. Guiry M.D., Guiry G.M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2024. URL: <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 17.01.2024).
8. Баринаева С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.
9. Гецен М.В. Водоросли в экосистемах Крайнего Севера / ред. М.М. Голлербах. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1985. 165 с.
10. Сафонова Т.А. Водоросли горных водотоков юга Западной Сибири. Разнообразие и таксономическая структура // *Сиб. экол. журн.* 1997. Т. 4, № 1. С. 91–95.
11. Комулайнен С.Ф. Фитоперифитон рек Республики Карелия // *Бот. журн.* 2004. Т. 89, № 3. С. 354–370. EDN: MYESUU.

References

1. Printz H. Contributiones ad floram Asiae interioris pertinentes. I. Die Chlorophyceen des südlichen Sibiriens und des Uriankailandes. *Kongelige Norske Videnskabernes Selskab Skrifter*. 1915;4:1-59.
2. Natural conditions of the Tuvan Autonomous Region. *The works of the Tuvan complex expedition*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1957;111. 275 p. (In Russ.).
3. Kulikovskiy M.S., Glushchenko A.M., Genkal S.I., Kuznetsova I.V. *Key to diatoms of Russia*. Yaroslavl: Filigray; 2016. 803 p. (In Russ.).
4. Vasser S.P., Kondratyeva N.V., Masyuk N.P. et al. *Algae*. A reference book. Kiev: Scientific Thought; 1989. 608 p. (In Russ.).
5. Krammer K. *Cymbella*. *Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland waters and comparable habitats*. H. Lange-Bertalot (ed.), A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2002;3. 584 p.
6. Komarek J., Anagnostidis K. *Cyanoprokaryota. 2 Oscillatoriales*. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. B. Büdel, L. Krienitz, G. Gärtner & M. Schagerl (eds.). München: Elsevier, 2005;(2). 759 p.

7. Guiry M.D., Garry G.M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2024. Available from: <http://www.algaebase.org> [Accessed 17th January 2024].

8. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. *Biodiversity of algae indicators of the environment*. Tel Aviv: Pilies Studio; 2006. 498 p. (In Russ.).

9. Getsen M.V. *Algae in the ecosystems of the Far North*. MM. Hollerbach (ed.). Leningrad: Science, Leningrad Department; 1985. 165 p. (In Russ.).

10. Safonova T.A. Algae of mountain streams of the south of Western Siberia. Diversity and taxonomic structure. *Siberian Ecological Journal*. 1997;4(1):91-95. (In Russ.).

11. Komulainen S.F. Phytoperiphyton of the rivers of the Republic of Karelia. *Botanical Journal*. 2004;89(3):354-370. (In Russ.). EDN: MYESUU.

Информация об авторах

Юрий Витальевич Науменко – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник.

Чечекмаа Дембиреловна Назын – кандидат биологических наук, заместитель директора по науке.

Елена Сергеевна Кашкак – кандидат биологических наук, доцент кафедры химии.

Урана Владимировна Ондар – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры химии.

Урана Спартаковна Ооржак – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры химии, заведующая кафедрой химии.

Information about the authors

Yury V. Naumenko – Doctor of Science (Biology), Leading Researcher.

Chechekmaa D. Nazyn – Candidate of Science (Biology), Deputy Director for Science.

Elena S. Kashkak – Candidate of Science (Biology), Associate Professor of the Department of Chemistry.

Urana V. Ondar – Candidate of Science (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry.

Urana S. Oorzhak – Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry, Head of the Department of Chemistry.

Статья поступила в редакцию 07.09.2023; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 07.09.2023; approved after reviewing 24.10.2024; accepted for publication 17.02.2025.

Научная статья
УДК 630*181.28
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-133-139>

ОЦЕНКА ИНТРОДУКЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНОСТИ НЕКОТОРЫХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРОДА УФЫ

Н.В. Полякова^{1✉}, Ф.К. Мурзабулатова², Р.Г. Абдуллина³, Р.А. Билалова⁴, Н.А. Рязанова⁵

^{1, 2, 3, 5} Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Республика Башкортостан, Россия.

⁴ Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия.

¹ barhan93@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3717-0308>

² murzabulatova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8024-9863>

³ rimmaabdullina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6512-7884>

⁴ nroza@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0449-6205>

⁵ nad-ryazanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3131-9404>

Аннотация. Представлены результаты многолетних (1999–2017 гг.) наблюдений за наиболее крупными родовыми комплексами растений Южно-Уральского ботанического сада-института Уфимского федерального исследовательского центра РАН. Цель работы – дать оценку интродукционной устойчивости и перспективности наиболее устойчивых и перспективных для Башкирского Предуралья древесных растений. В связи с поставленной целью были определены следующие задачи: изучить сезонные ритмы развития древесных растений и особенности их роста и семенного размножения; оценить зимостойкость. В результате выделены 17 видов рода *Sorbus*, 10 видов *Clematis*, 7 видов и 1 форма рода *Acer*, по 3 вида родов *Hydrangea* и *Deutzia*, 10 видов рода *Syringa*. Эти виды по 100-балльной шкале оценки перспективности и устойчивости в условиях Башкирского Предуралья набирают от 91 до 100 баллов: проходят все фазы сезонного развития, обладают высокой зимостойкостью, сохраняют форму роста, имеют хорошую побегообразовательную способность; большинство из них размножаются самосевом. Все это позволяет рекомендовать данные виды для использования в декоративном садоводстве и зеленом строительстве Республики Башкортостан и сопредельных регионов.

Ключевые слова: интродукционная устойчивость, перспективность, зимостойкость, сезонное развитие, Республика Башкортостан

Для цитирования: Полякова Н.В., Мурзабулатова Ф.К., Абдуллина Р.Г., Билалова Р.А., Рязанова Н.А. Оценка интродукционной устойчивости и перспективности некоторых древесных растений в условиях города Уфы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 133–139. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-133-139>

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Южно-Уральского ботанического сада-института Уфимского федерального исследовательского центра РАН по теме № 125012200599-6.

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

Original article

ASSESSMENT OF THE INTRODUCTION RESISTANCE AND PROSPECTS OF SOME WOODY PLANTS IN THE CONDITIONS OF THE CITY OF UFA

N.V. Polyakova^{1✉}, F.K. Murzabulatova², R.G. Abdullina³, R.A. Bilalova⁴, N.A. Ryazanova⁵

^{1, 2, 3, 5} Southural Botanical Garden-Institute - a separate structural unit of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

⁴ Bashkir State Agrarian University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

© Полякова Н.В., Мурзабулатова Ф.К., Абдуллина Р.Г., Билалова Р.А., Рязанова Н.А., 2025

¹ barhan93@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-3717-0308>

² murzabulatova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8024-9863>

³ rimmaabdullina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6512-7884>

⁴ nroza@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0449-6205>

⁵ nad-ryazanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3131-9404>

Abstract. The results of long-term (1999-2017) observations of the largest generic plant complexes of the South Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences are presented. The purpose of the work is to assess the introduction resistance and prospects of the most stable and promising woody plants for the Bashkir Cis-Urals. In connection with this goal, the following tasks were identified: to study the seasonal rhythms of development of woody plants; assess the winter hardiness of plants; study the characteristics of growth and seed propagation of the studied plants. As a result, 17 species of the genus *Sorbus*, 10 species of *Clematis*, 7 species and 1 form of the genus *Acer*, 3 species of the genera *Hydrangea* and *Deutzia*, as well as 10 species of the genus *Syringa* were identified. These species, according to 100-point scale for assessing prospects and sustainability in the conditions of the Bashkir Cis-Urals, score from 91 to 100 points: they go through all phases of seasonal development, have high winter hardiness, retain their growth form, have good shoot-forming ability, most of them are able to reproduce by self-sowing. All this allows us to recommend these species for use in ornamental gardening and green construction in the Republic of Bashkortostan and adjacent regions.

Keywords: introduction resistance, prospects, winter hardiness, seasonal development, Republic of Bashkortostan

For citation: Polyakova N.V., Murzabulatova F.K., Abdullina R.G., Bilalova R.A., Ryazanova N.A. Assessment of the Introduction Resistance and Prospects of Some Woody Plants in the Conditions of the City of Ufa. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):133-139. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-133-139>

Acknowledgments: the work was performed within the framework of the state assignment of the South Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences on topic No. 125012200599-6.

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

Введение

Интродукция является основой для обогащения ассортимента декоративных и хозяйственно ценных растений в регионах с континентальным и резко континентальным климатом и достаточно обедненной природной флорой. Особенно это относится к аридным и горным областям, а также регионам Западной и Восточной Сибири [1–4]. В современных условиях, когда важнейшее значение приобретают различные аспекты импортозамещения, акклиматизация и успешное выращивание хозяйственно ценных растений, новых для конкретного региона, выходят на первый план [5–7]. Получение полной информации об адаптационных возможностях растений в новых условиях возможно при комплексных интродукционных исследованиях на базах коллекций ботанических садов, дендрариев и других научных учреждений [8–12].

В Южно-Уральском ботаническом саду-институте Уфимского федерального исследовательского центра РАН (далее – ЮУБСИ УФИЦ РАН) комплексные интродукционные исследования устойчивости растений в климатических условиях Башкирского Предуралья проводятся на протяжении многих лет. На базе дендрологических коллекций изучены перспективность и устойчивость целого ряда родовых комплексов.

Цель данной работы – характеристика наиболее устойчивых и перспективных для Башкирского Предуралья видов родов гортензия, дейция, клематис, клен, рябина и сирень. В связи с поставленной целью определены следующие задачи: изучить сезонные ритмы развития древесных растений, особенности роста и семенного размножения, оценить их зимостойкость.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – наиболее крупные родовые комплексы древесных растений из коллекции ЮУБСИ: *Acer*, *Clematis*, *Deutzia*, *Hydrangea*, *Sorbus*, *Syringa*. Срок наблюдений – 20–25 лет (1999–2023 гг.). За основу комплексной оценки устойчивости и перспективности древесных интродуцентов приняты методики из [13, 14]. Зимостойкость оценивалась по шкале, разработанной в Главном ботаническом саду [15]. Оценивались показатели: вызревание побегов, зимостойкость, сохранение формы роста, побегообразовательная способность, генеративное развитие, способность размножения в культуре.

Климат Башкирского Предуралья, в пределах которого находится ботанический сад, континентальный, характеризуется холодной зимой и теплым летом, большой амплитудой колебаний температуры в течение года, ранними осенними и поздними весенними заморозками. В г. Уфе средняя многолетняя температура воздуха составляет +3,4 °С, средняя температура января –13,5 °С, абсолютный минимум –48,5 °С. Зимой часто наблюдаются оттепели, количество безморозных дней составляет в среднем 144 дня. Средняя температура июля +19,5 °С, абсолютный максимум зафиксирован на уровне +40 °С. Среднегодовое количество осадков – 500–590 мм, в теплый период – 350 мм. Снежный покров устанавливается в ноябре и держится в среднем 155 сут. [16]. Основные типы почв – серые и темно-серые лесные, которые образуются на элювиально-делювиальных карбонатных отложениях, характеризуются глинистым и тяжелосуглинистым механическим составом и малым содержанием гумуса [17].

Результаты и обсуждение

Согласно методикам определения интродукционной устойчивости и перспективности растений, наиболее устойчивыми являются таксоны, суммарно набравшие от 91 до 100 баллов. В результате анализа многолетних данных выделена группа древесных видов, которые в условиях Республики Башкортостан зарекомендовали себя максимально адаптированными к местному климату (таблица).

Наиболее перспективные виды древесных растений для интродукции в условиях Башкирского Предуралья / The most promising species of woody plants for introduction in the conditions of the Bashkir Cis-Urals

Вид	Одревеснение побегов	Зимостойкость	Сохранение формы роста	Побегообразовательная способность	Прирост в высоту	Генеративное развитие	Возможный способ размножения	Сумма баллов
<i>Acer campestre</i> L.	20	20	10	5	5	25	10	95
<i>A. campestre</i> ssp. <i>leiocarpum</i> var. <i>lobatum</i> (Opiz.) Schwer.	20	20	10	5	5	25	10	95
<i>A. tataricum</i> subsp. <i>ginnala</i> (Maxim.) Wesm.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>A. mono</i> Maxim.	20	25	10	5	5	20	7	92
<i>A. negundo</i> L.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>A. platanoides</i> L.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>A. saccharinum</i> L.	20	25	10	5	5	20	7	92
<i>A. tataricum</i> L.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>Clematis alpina</i> subsp. <i>sibirica</i> (L.) Kuntze	20	25	10	10	–	25	7	97
<i>C. hexapetala</i> Pall.	20	25	10	10	–	25	10	100
<i>C. manschurica</i> Rupr.	20	25	10	10	–	25	10	100
<i>C. paniculata</i> Thunb.	20	25	10	10	–	25	10	100
<i>C. recta</i> L.	20	25	10	10	–	25	10	100
<i>C. recta</i> L. f. <i>purpurea</i>	20	25	10	10	–	25	10	100
<i>C. viticella</i> L.	20	25	10	10	–	25	10	100
<i>C. dioscoreifolia</i> Lefl. et Vant.	20	25	10	10	–	25	7	97

Окончание таблицы

Вид	Одресневшие побегов	Зимостойкость	Сохранение формы роста	Побегообразовательная способность	Прирост в высоту	Генеративное развитие	Возможный способ размножения	Сумма баллов
<i>C. integrifolia</i> L.	20	25	10	10	–	25	5	95
<i>C. tangutica</i> (Maxim.) Korsh	15	25	10	10	–	25	10	95
<i>Hydrangea bretschneideri</i> Dipp.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>H. heteromalla</i> D. Don	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>H. xanthoneura</i> Diels.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>S. amurensis</i> Koehne	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. armeniaca</i> Hedl.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. americana</i> Marsh.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. × arnoldiana</i> Rehd.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. caucasica</i> Zinserl.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. cashmiriana</i> Hedl.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. chamaemespilus</i> (L.) Crantz.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. commixta</i> Hedl.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. frutescens</i> McAll.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. decora</i> (Sarg.) Schneid.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. discolor</i> (Maxim.) Hedl.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. koehneana</i> C.K. Schneid.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. × latifolia</i> (Lam.) Pers.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. mougeotii</i> Soy.-Will. Et Godr.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. pohuashanensis</i> (Hance) Hedl.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. rufoferruginea</i> (Schneid.) Schneid.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. sibirica</i> Hedl.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. turkestanica</i> (Franch.) Hedl.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. × thuringiaca</i> (Ilse) Fritsch.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. teodorii</i> × <i>Sorbocotoneaster pozdnyjkovii</i> Pojark.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>Syringa emodi</i> Wall	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. × henryi</i> C.K. Schneid.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. josikaea</i> J. Jacq. ex Rchb.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>S. komarowii</i> C.K. Schneid.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. pubescens</i> Turcz.	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. reticulata</i> (Blume) H. Hara ssp. <i>amurensis</i> (Rupr.) P.S. Green et M.C. Chang	20	25	10	5	5	25	7	97
<i>S. sweginzowii</i> Koehne et Lingelsh.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>S. wolfii</i> C.K. Schneid.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>S. velutina</i> Kom.	20	25	10	5	5	25	10	100
<i>S. vulgaris</i> L.	20	25	10	5	5	25	10	100

Наиболее многочисленной по количеству видов является группа рода *Sorbus*. Наиболее устойчивыми оказались 17 видов, набравших от 97 до 100 баллов, причем максимальное количество баллов отмечено только у одного вида – аутохтонной *Sorbus aucuparia*. Остальные высокоустойчивые виды рябины отличаются от нее только отсутствием самосева, хотя практически ежегодно цветут, плодоносят и дают жизнеспособные семена.

В группе древовидных лиан выделены 10 наиболее устойчивых видов клематиса. Среди них 6 видов имеют максимальное количество баллов по устойчивости и перспективности: *C. hexapetala*, *C. manschurica*, *C. paniculata*, *C. recta*, *C. recta* f. *purpurea*, *C. viticella*. У остальных высокоустойчивых видов общее количество баллов снижено за счет неполного вызревания побегов (*C. tangutica*) или отсутствия самосева (*C. alpina* subsp. *sibirica*, *C. dioscoreifolia*, *C. integrifolia*).

Среди интродуцированных в ЮУБСИ видов рода *Acer* выделены 7 видов и 1 форма, набравших от 92 до 100 баллов по перспективности (таблица). Максимальные показатели имеют *A. tataricum* subsp. *ginnala*, *A. negundo*, *A. platanoides*, *A. tataricum*. У *Acer campestre* и его формы баллы снижены за счет понижения зимостойкости в отдельные суровые зимы, а *A. mono* и *A. saccharinum* завязывают небольшое количество семян и не размножаются самосевом.

Минимальное количество высокоустойчивых и перспективных для Башкирского Предуралья видов содержат коллекции родов *Hydrangea* и *Deutzia*. Среди гортензий всего 3 вида характеризуются максимальными показателями устойчивости и перспективности (таблица). Все остальные виды гортензий имеют по сумме значительно меньшее количество баллов и не относятся к высокоустойчивым. В коллекции дейций максимальные баллы составляют 95–97 и отмечены у 3 видов. Необходимо отметить, что отсутствие 100-балльных показателей у дейций объясняется тем, что ни один вид этого рода в условиях ЮУБСИ не размножается самосевом.

К высокоустойчивым видам рода *Syringa* отнесены практически все виды коллекции сирени; максимальные баллы имеют виды, размножающиеся самосевом: *S. josikaea*, *S. sweginzowii*, *S. wolfii*, *S. velutina*, *S. vulgaris* (таблица). Остальные виды хотя и не дают самосева, но в условиях ботанического сада абсолютно зимостойки, хорошо плодоносят и имеют достаточно высокое качество семян.

Выводы

1. Интегральная оценка интродукционной устойчивости и перспективности наиболее крупных родовых комплексов ЮУБСИ УФИЦ РАН позволила выделить группу наиболее устойчивых и перспективных для Башкирского Предуралья древесных растений, в составе которой 17 видов рода *Sorbus*, 10 видов *Clematis*, 7 видов и 1 форма рода *Acer*, по 3 вида родов *Hydrangea* и *Deutzia*, а также 10 видов рода *Syringa*.

2. Эти виды проходят все фазы сезонного развития, обладают высокой зимостойкостью, сохраняют форму роста, имеют хорошую побегообразовательную способность, большинство из них способно размножаться самосевом. Все это позволяет рекомендовать данные виды для использования в декоративном садоводстве и зеленом строительстве Республики Башкортостан и сопредельных регионов.

Список источников

1. Иманбаева А.А., Белозеров И.Ф. Некоторые физиологические индикаторы устойчивости древесных растений в аридных условиях пустыни Мангистау // Садоводство и виноградарство. 2019. № 3. С. 13–26. EDN: KDCHPE. <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2019-3-13-26>
2. Прокопьев А.С., Чернова О.Д., Беляева Т.Н., Катаева Т.Н. Редкие растения Сибири в культуре: видовое разнообразие, интродукционная оценка // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56, № 4. С. 291–313. EDN: KNJWQQ. <https://doi.org/10.31857/S003399462004007X>
3. Билялова Р.А. *Actinidia kolomikta* (Maxim.) Maxim. – перспективная культура для Южного Урала // Вестн. КрасГАУ. 2021. № 3 (168). С. 52–56. EDN: TIEWEP. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-3-52-56>
4. Семенютина А.В., Цой М.В., Сапронов В.В. Опыт интродукции хвойных растений в условиях сухой степи // Наука. Мысль: электр. период. журн. 2021. Т. 11, № 1. С. 17–32. EDN: DZSPMI. <https://doi.org/10.25726/17664-5483-8738-s>

5. Паутова И.А. Некоторые итоги интродукции полезных растений флоры Сибири на Северо-Западе России // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2021. Т. 20, № 1. С. 345–351. EDN: SSUNAV. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2021070>
6. Мурзабулатова Ф.К., Полякова Н.В., Шигапов З.Х. Древесные медоносы для создания участка длительного цветения в условиях Башкирского Предуралья // Таврический вестн. аграр. науки. 2022. № 3 (31). С. 137–147. EDN: UCTVYC.
7. Калмыкова Е.В., Петров Н.Ю., Кузьмин П.А., Крылов П.А., Мельник К.А. Комплексная оценка биоразнообразия дендрологических ресурсов ФНЦ агроэкологии РАН для выявления адаптированного генофонда древесных видов на юге России // Изв. НВ АУК. 2023. № 3 (71). С. 54–66. EDN: CGVDFQ. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-03-05>
8. Данилова Н.С., Романова А.Ю., Рогожина Т.Ю. Методические аспекты подбора интродуцентов для Центральной Якутии // Вестн. Якутского гос. ун-та. 2006. Т. 3, № 4. С. 14–21. EDN: JWTJFZ.
9. Polyakova N.V., Shigapov Z.Kh. Dynamics of Phenological Parameters in Some Lilac Species in a Changing Climate // Contemporary Problems of Ecology. 2023. Vol. 16, № 2. P. 158–165. EDN: AOTCNM. <https://doi.org/10.1134/s1995425523020117>
10. Холопук Г.А., Торчик В.И., Келько А.Ф. Декоративные формы рода Туя (Thuja L.) в коллекции Центрального ботанического сада НАН Беларуси // Науч. тр. Чебоксарского филиала Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН. 2019. № 13. С. 97–102. EDN: QRENAM.
11. Глухов А.З., Гридько О.А. Некоторые древесные интродуценты в озеленении города Донецка // Труды по интродукции и акклиматизации растений. Ижевск: Удмуртский фед. исслед. центр Уральского отделения РАН, 2021. С. 434–437. EDN: НВХМАЕ.
12. Малышева С.К. Интродукционная устойчивость видов рода Spiraea L. при культивировании на юге Приморского края // Политемат. сетевой электр. науч. журн. Кубанского гос. аграр. ун-та. 2021. № 172. С. 173–181. EDN: EFSPLH. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-172-010>
13. Латин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений: сб. науч. работ. М.: Главный ботанический сад АН СССР, 1973. С. 7–67.
14. Трулевич Н.В. Эколого-фитоценологические основы интродукции растений. М.: Наука, 1991. 214 с.
15. Латин П.И., Александрова М.С., Бородина Н.А. [и др.] Древесные растения Главного ботанического сада АН СССР. М.: Наука, 1975. 547 с.
16. Путенихин В.П., Путенихина К.В., Шигапов З.Х. Кедр сибирский в Башкирском Предуралье и на Южном Урале: биологические и лесоводственные особенности при интродукции. Уфа: Башкирская энциклопедия, 2017. 248 с.
17. Кираев Р.С., Амирханов Д.В., Леонтьев И.П. Башкортостан: климат, почвы, культуры, сорта. Уфа, 2015. 106 с.

References

1. Imanbaeva A.A., Belozero I.F. Some physiological indicators of the resistance of woody plants in the arid conditions of the Mangistau desert. *Horticulture and Viticulture*. 2019;(3):13-26. (In Russ.). EDN: KDCHPE. <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2019-3-13-26>
2. Prokopiev A.S., Chernova O.D., Belyaeva T.N., Kataeva T.N. Rare plants of Siberia in culture: species diversity, introduction assessment. *Plant Resources*. 2020;56(4):291-313. (In Russ.). EDN: KNJWQQ. <https://doi.org/10.31857/S003399462004007X>
3. Bilalova R.A. Actinidia kolomikta (Maxim.) Maxim. – a promising crop for the Southern Urals. *Bulletin of KSAU*. 2021;(3):52-56. (In Russ.). EDN: TIEWEP. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-3-52-56>
4. Semenyutina A.V., Tsoi M.V., Sapronov V.V. Experience of introducing coniferous plants in dry steppe conditions. *The Science. Thought: electronic periodical magazine*. 2021;11(1):17-32. (In Russ.). EDN: DZSPMI. <https://doi.org/10.25726/17664-5483-8738-s>
5. Pautova I.A. Some results of the introduction of useful plants of the flora of Siberia in the North-West of Russia. *Problems of Botany in Southern Siberia and Mongolia*. 2021;20(1):345-351. (In Russ.). EDN: SSUNAV. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2021070>
6. Murzabulatova F. K., Polyakova N. V., Shigapov Z. H. Woody honey plants to create a site of long-term flowering in the conditions of the Bashkir Cis-Urals. *Tauride Bulletin of Agrarian Science*. 2022;(3):137-147. (In Russ.). EDN: UCTVYC.
7. Kalmykova E. V., Petrov N. Yu., Kuzmin P. A., Krylov P. A., Melnik K. A. Comprehensive assessment of the biodiversity of dendrological resources of the Federal Scientific Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences to identify the adapted gene pool of tree species in the south of Russia. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2023;(3):54-66. (In Russ.). EDN: CGVDFQ. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-03-05>

8. Danilova N.S., Romanova A.Yu., Rogozhina T.Yu. Methodological aspects of selecting introduced species for Central Yakutia. *Bulletin of Yakut State University*. 2006;3(4):14-21. (In Russ.). EDN: JWTJFZ.
9. Polyakova N. V., Shigapov Z. Kh. Dynamics of Phenological Parameters in Some Lilac Species in a Changing Climate. *Contemporary Problems of Ecology*. 2023;16(2):158-165. EDN: AOTCNM. <https://doi.org/10.1134/s1995425523020117>
10. Holopuk G.A., Torchik V.I., Kelko A.F. Decorative forms of the genus Thuja (Thuja L.) in the collection of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus. *Scientific works of the Cheboksary branch of the Tsitsin Main Botanical Garden*. 2019;(13):97-102. (In Russ.). EDN: QRENAM.
11. Gluhov A.Z., Grydko O.A. Some tree introduced species in the landscaping of the city of Donetsk. *Works on the introduction and acclimatization of plants*. Izhevsk: Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021:434-437. (In Russ.). EDN: HBXMAE.
12. Malysheva S.K. Introduction resistance of species of the genus Spiraea L. during cultivation in the south of Primorsky Krai. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2021;(172):173-181. (In Russ.). EDN: EFSPLH. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-172-010>
13. Lapin P.I., Sidneva S.V. Assessment of the prospects for the introduction of woody plants based on visual observations. *Experience with the introduction of woody plants*. Moscow: The Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences; 1973:7-67. (In Russ.).
14. Trulevich N.V. *Ecological and phytocenotic basis of plant introduction*. Moscow: Science; 1991. 214 p. (In Russ.).
15. Lapin P.I., Aleksandrova M.S., Borodina N.A. et al. *Woody plants of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences*. Moscow: Science; 1975. 547 p. (In Russ.).
16. Putenihin V.P., Putenihina K.V., Shigapov Z.H. *Siberian pine in the Bashkir Cis-Urals and the Southern Urals: biological and silvicultural features during introduction*. Ufa: Bashkir Encyclopedia; 2017. 248 p. (In Russ.).
17. Kiraev R.S., Amirhanov D.V., Leontiev I.P. *Bashkortostan: climate, soils, crops, varieties*. Ufa, 2015. 106 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Наталья Викторовна Полякова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник.

Фануза Кавиевна Мурзабулатова – кандидат биологических наук, научный сотрудник.

Римма Галимзяновна Абдуллина – кандидат биологических наук, научный сотрудник.

Роза Альтафовна Билалова – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры лесоводства и ландшафтного дизайна.

Надежда Александровна Рязанова – кандидат биологических наук, научный сотрудник.

Information about the authors

Natalya V. Polyakova – Candidate of Science (Biology), Leading Researcher.

Fanuza K. Murzabulatova – Candidate of Science (Biology), Researcher.

Rimma G. Abdullina – Candidate of Science (Biology), Researcher.

Roza A. Bilalova – Candidate of Science (Biology), Senior Lecturer at the Department of Forestry and Landscape Design.

Nadezhda A. Ryazanova – Candidate of Science (Biology), Researcher.

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 17.02.2025.
The article was submitted 17.09.2024; approved after reviewing 24.10.2024; accepted for publication 17.02.2025.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Материалы конференции

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-140-143>

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «БИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ: ИЗУЧЕНИЕ, СОХРАНЕНИЕ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ, РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ» (г. Керчь, 17–23 сентября 2024 г.)

**Виктор Аркадьевич Миноранский^{1✉}, Андрей Викторович Кулиш²,
Юлия Валерьевна Тимофеевко³**

¹ Ассоциация «Живая природа степи», Ростов-на-Дону, Россия

^{1,3} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

² Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Республика Крым, Россия

¹ priroda.rostov@yandex.ru[✉]

³ e-mail@sfnedu.ru

Для цитирования: Миноранский В.А., Кулиш А.В., Тимофеевко Ю.В. IV Международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (г. Керчь, 17–23 сентября 2024 г.) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 1. С. 140–142. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-140-143>

Conference materials

IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE “BIOLOGICAL DIVERSITY: STUDY, CONSERVATION, RESTORATION, RATIONAL USE” (Kerch, September 17-23, 2024)

Victor A. Minoransky^{1✉}, Andrei V. Kulish², Yulia V. Timofeenko³

¹ Association “Wild Nature of the Steppe”, Rostov-on-Don, Russia

^{1,3} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

² Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia

¹ priroda.rostov@yandex.ru[✉]

³ e-mail@sfnedu.ru

For citation: Minoransky V.A., Kulish A.V., Timofeenko Yu.V. IV International Scientific and Practical Conference “Biological Diversity: Study, Conservation, Restoration, Rational Use” (Kerch, September 17-23, 2024). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(1):140-142. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-140-143>

По инициативе ученых и специалистов кафедры водных биоресурсов и марикультуры Керченского государственного морского технологического университета (КГМТУ), Ассоциации «Живая природа степи» (Ассоциация), Южного федерального университета (ЮФУ), Азовского НИИ рыбного хозяйства (АзНИИРХ), Карадагской научной станции – природного заповедника РАН (КНС – ПЗ РАН), заповедника «Опукский», Института биологии южных морей РАН (ИБЮМ) с 2018 г. проводятся в г. Керчи регулярные конференции по биоразнообразию. Первая из них прошла 19–23.09.2018, вторая – 27–30.05.2020, третья – 13–18.09.2022. Здесь же состоялась и четвертая конференция – 17–23.09.2024.

Первоначально на ней предполагалось обсуждение проблем степной зоны, Азовского и Черноморского бассейнов, поэтому в состав программного комитета вошли специалисты России, Абхазии, Турции. Однако экологические вопросы и проблемы биоразнообразия волнуют многие регионы России и других стран, и состав комитета в 2022–2024 гг. пополнился специалистами Казахстана, Китая и Белоруссии, ряда структур РФ из Москвы и Санкт-Петербурга. В 2024 г. в IV конференции участвовали 190 чел. из более 70 организаций, включая академика РАН, 25 докторов и 78 кандидатов наук. Были представители Абхазии (Ин-т экологии АН), Беларуси (Ин-т генетики и цитологии НАН, др.), Казахстана (Костанайский ун-т), Узбекистана (Ин-т зоологии АН, Ин-т микробиологии АН, Чаткальский заповедник), Вьетнама, Монголии (Ин-т географии и геоэкологии АНМ), юга нашей страны, Москвы, Санкт-Петербурга, новых территорий (Херсонская область, ЛНР, ДНР), Калининграда, Архангельска, Новосибирска, Петропавловска-Камчатского, Южно-Сахалинска, Владивостока и др. Участвовали сотрудники академических и отраслевых НИИ (ЗИН, ИПЭЭ, ЮНЦ, БЮМ, Мурманский МБИ РАН, Тюменский НЦ СО РАН и т.д.), университетов (МГУ, СПбГУ, РГАУ – МСХА, КрымФУ, КубГУ, РязГУ, КазФУ, СургутГУ и т.д.), работники особо охраняемых природных территорий (ООПТ), среднего образования и др. Представлены ВНИРО и его филиалы (Санкт-Петербургский, Азово-Черноморский, Волжско-Каспийский, Псковский, Северный, Магаданский, Полярный, др.).

Тематика сообщений затрагивала разные группы и виды биоразнообразия (вредные и полезные для людей бактерии, грибы, растения, животные). Многие доклады освещали состав организмов отдельных групп биоты различных территорий, их функциональную роль в биоценозах и для человека. Значительное внимание этому было уделено в работах, касающихся активно осваиваемых северных и восточных регионов страны. Большое количество исследований выполнено в центральных и южных районах, где наблюдения ведутся специалистами продолжительное время. Выясняются происходящие изменения в составе биоты и их причины. Ряд сообщений касается зараженности рыб и иных животных паразитами (Северный филиал ВНИРО, Калининградский ГТУ, МГУ-Вьетнам, др.). Помимо общепринятых приемов исследований авторы используют видеокамеры, новые цифровые датчики, молекулярную маркировку и генетическую паспортизацию животных, иные методы изучения (ООПТ, Ин-т генетики и цитологии НАН Беларуси, Полесский аграрно-экологический ин-т НАН Беларуси и т.д.). Изучается влияние антропогенных факторов на различные группы и виды организмов. Рассматривается их состав, динамика численности и биомассы, значение в антропогенных и природных экосистемах, в частности планктонные фитоценозы, зоопланктон и зообентос в акватории порта Кавказ, в Маньчжских и иных водоемах (ЮНЦ РАН); почвенные микромицеты, растения, блохи, мелкие млекопитающих, другие организмы в лесопарках (Крым, Казань, Тюмень, Сургут, др.).

Сокращение запасов ресурсных видов, перевод части из них в статус редких и исчезающих (стерлядь, белуга, русский осетр, шемая, серый гусь, серая утка, дрофа, стрепет, сайгак и т.д.) заставляют не только разрабатывать меры по сохранению и увеличению их запасов, но и осваивать малоизученные и перспективные объекты промысла. Этими вопросами занимаются специалисты ВНИРО и его филиалов, ряд структур АН, вузов, других организаций.

Наиболее эффективной формой охраны природы являются ООПТ. В работе конференции участвовали представители Крымского, Черноморского, Карадагского, Опукского, Ростовского, Дагестанского, Воронежского и других заповедников, ряда заказников и иных ООПТ. Здесь ведется мониторинг различных видов, групп растений и животных, исследуется влияние на них

климатических и антропогенных факторов, совершенствуются и разрабатываются новые приемы охраны природы. Один из важных приемов охраны природы – сбор материала, издание региональных и государственных Красных книг. Работы по данной теме ведутся представителями ООПТ академических, вузовских и иных структур.



В последнее десятилетие уделяется большое внимание экологическому образованию и воспитанию молодежи в школах, колледжах, институтах, различных общественных структурах. На конференции сообщения по этому вопросу сделали представители Ассоциации, Воронежского колледжа и Воронежского института высших технологий, лицея № 1 Брянского р-на Брянской области, Регионального ресурсного центра дополнительного образования и воспитания г. Южно-Сахалинска, Черноморского заповедника и других организаций. Опыт данной работы свидетельствует, что она во многих регионах развивается и дает результаты.

Участники конференции наладили научные и деловые связи между разными структурами, посетили музей фауны и флоры Мирового океана отдела «Керченский» АзНИИРХ, Каралларские степи, бухту Генеральских пляжей, КНС – ПЗ РАН (музей истории и природы заповедника, дельфинарий, экологическая тропа «Большой Карадаг»). Материалы IV конференции, как и предыдущих, опубликованы.

Информация об авторах

В.А. Миноранский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоологии, Южный федеральный университет; президент ассоциации «Живая природа степи».

А.В. Кулиш – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой водных биоресурсов и марикультуры.

Ю.В. Тимофеев – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры зоологии.

Information about the authors

V.A. Minoransky – Doctor of Science (Agricultural Science), Professor of the Department of Zoology, Southern Federal University; President of the Association “Wild Nature of the Steppe”.

A.V. Kulish – Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Aquatic Biore-sources and Mariculture.

Yu.V. Timofeenko – Candidate of Science (Biology), Senior Lecturer of the Department of Zoology.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Персоналии

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-144-146>

Александр Васильевич Абанин
(к 70-летию)

Personalities

Alexander Vasilievich Abanin
(to the 70th Anniversary)



6 февраля 2025 г. исполнилось 70 лет Александру Васильевичу Абанину, математику, хорошо известному в России и в мире благодаря своим замечательным научным достижениям и педагогическому таланту, почетному работнику высшего профессионального образования Российской Федерации, профессору, доктору физико-математических наук, заведующему кафедрой математического анализа и геометрии Института математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича Южного федерального университета, заведующему отделом математического анализа Южного математического института ВНЦ РАН.

От родителей, офицера Советской армии Василия Фёдоровича и учительницы Лидии Степановны, он унаследовал лучшие черты родового характера – целеустремленность, силу воли, исключительную порядочность. А в науку Александра Васильевича привели учителя ростовской математической школы № 5. Математик Анна Владимировна Мардирасова, физик Анна Васильевна Артёмова и их коллеги в немалой степени способствовали формированию атмосферы дружеской конкуренции, поддерживали стремление к постижению нового, развивали самостоятельное творческое мышление.

В 1972 г., после окончания школы, А.В. Абанин поступил на отделение математики механико-математического факультета Ростовского государственного университета. Известные учёные и прекрасные преподаватели, о которых Александр Васильевич рассказал в своих воспоминаниях «С благодарностью – о тех, кто помог мне стать математиком и помогает им быть»¹, в полной мере помогли будущему учёному определиться с научными интересами, а студенческая жизнь проявила лучшие черты характера А.В. Абанина, став гармоничным соединением отличной учёбы, интенсивной исследовательской работы и активной жизненной позиции.

Ещё в 50-е г. XX в. по инициативе профессора Михаила Григорьевича Хапланова на мехмате возникло новое направление исследований, посвященных линейным задачам анализа. А.В. Абанин учился в то время, когда это направление достигло своего расцвета благодаря работам таких ярких личностей и сильных математиков, как Михаил Михайлович Драгилов, Юрий Фёдорович Коробейник и Вячеслав Павлович Захарюта. Хапланов стал первым научным руководителем Александра Васильевича. Однако, когда вчерашний выпускник мехмата поступил в аспирантуру (1977 г.), Михаил Григорьевич умер. Это и привело А.В. Абанина на кафедру математического анализа, новым научным руководителем стал заведующий кафедрой Ю.Ф. Коробейник. «В будущем о своём выборе мне не пришлось жалеть, несмотря на то что первоначальные требования, предъявленные Юрием Фёдоровичем, были хотя и справедливыми, но весьма жесткими», – так впоследствии напишет об этом сам Александр Васильевич.

Аспирант Абанин активно включился в исследования, связанные с новой теорией представляющих систем, основы которой были заложены Ю.Ф. Коробейником: защитил в 1981 г. кандидатскую диссертацию «Некоторые свойства представляющих систем и базисов», систематически изучал (слабо) достаточные множества в различных по структуре пространствах целых функций одной и многих переменных, а также их приложения к теории представляющих систем и уравнениям свертки, разрабатывал теорию абсолютно представляющих систем подпространств в спектрах локально выпуклых пространств. В 1995 г. он успешно защитил докторскую диссертацию «Слабо достаточные множества и абсолютно представляющие системы».

Следует отметить, что научные интересы Александра Васильевича всегда отличались значительным разнообразием. Нельзя не упомянуть полученные им интересные результаты в области теории ультрадифференцируемых функций и распределений (итогом этой работы стала монография «Ультрадифференцируемые функции и ультрараспределения»), в разработке новых методов изучения порождающих идеалов в нерадиальных классах весовых пространств целых функций, геометрической характеристики нулевых множеств образующих порождающих идеалов, в ряде утверждений, продвинувших далеко вперёд исследования, связанные с уравнениями свёртки и теоремами деления в пространствах целых функций с двучленными асимптотиками роста и в пространствах ультрадифференцируемых функций.

По теории двойственности функциональных пространств А.В. Абанин опубликовал ряд работ, подготовленных совместно с профессором Наньянского технологического университета (Сингапур) Ле Хай Хоем и японским математиком Р. Ишимурой. Занимаясь исследованиями в области общей теории весовых пространств голоморфных функций, он получил важные результаты совместно с вьетнамским математиком Фам Чонг Тиеном, защитившим кандидатскую диссертацию под руководством А.В. Абанина в 2013 г.

Более 200 научных публикаций, среди которых статьи в высокорейтинговых журналах («Доклады АН», «Известия АН», «Математические заметки», «Сибирский математический журнал», *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, *Studia Mathematica*, *Mathematische Annalen*, *Mathematische Nachrichten*, *Proceedings of the American Mathematical Society* и т.п.), – лишь одна составляющая деятельности профессора Абанина. Вторая, не менее важная и значимая – педагогическая работа.

Она началась 1 ноября 1979 г., когда Александр Васильевич перевёлся в заочную аспирантуру и стал сотрудником кафедры математического анализа РГУ, связав с ней всю свою жизнь. Он прошёл путь от ассистента до профессора, пережил многочисленные реформы, а в 2000 г. принял эстафету у Ю.Ф. Коробейника и возглавил родную кафедру. В 2018 г., после объединения старейших университетских кафедр – геометрии и математического анализа – в единую

¹ См, например: URL: <https://mmcs.sfedu.ru/jdownload/finish/22-kafedra-matematicheskogo-analiza/904-a-v-abanin-s-blagodarnostyu-o-tekh-kto-pomog-mne-stat-matematikom-i-pomogaet-im-byt>

кафедру математического анализа и геометрии, А.В. Абанин был избран её заведующим, сумел сохранить традиции добросовестного профессионализма, сформировал крепкий работоспособный коллектив.

За 45 лет активной преподавательской деятельности Александр Васильевич прочитал более 15 различных курсов (основных, таких как математический анализ и теория функций комплексного переменного, и специальных, многие из которых были разработаны им самим и адресованы старшекурсникам, магистрантам и аспирантам мехмата, готовящимся к научной работе). В настоящее время он является одним из лучших лекторов Института математики, механики и компьютерных наук имени И.И. Воровича. Блестяще подготовленные лекции, честность, принципиальность и педагогический талант приносят ему заслуженное признание и уважение и коллег, и студентов.

К заслугам А.В. Абанина можно отнести и созданную им крепкую научную школу. Под его руководством 11 человек защитили кандидатские диссертации; фактически все они продолжают вести активные научные исследования, а свою профессиональную деятельность связали с преподаванием математики (ученики Александра Васильевича работают в Южном федеральном университете, Национальном университете Вьетнама, Финансовом университете при Правительстве Российской Федерации, Национальном исследовательском технологическом университете МИСИС, различных вузах и школах Ростовской области). Сам профессор не раз подчеркивал, что «*ученики заставляют меня держать себя в профессиональном тоне, находиться в постоянном поиске новых тем, идей и методов*», а те, кто прошёл его школу, в свою очередь, всегда отмечали, что А.В. Абанин был не только их научным руководителем, но и стал образцом профессионализма, у него они учились высокой требовательности к себе и своим ученикам, преданности делу, принципиальности и добросовестности.

В настоящее время кафедра математического анализа и геометрии стала базовой для возглавляемого профессором Абаниным отдела математического анализа Южного математического института ВНИЦ РАН. Александр Васильевич постоянно участвует в работе организационных комитетов различных международных конференций, регулярно выступает с докладами на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах, школах. В качестве научного руководителя и одного из основных исполнителей он принимал участие в выполнении проектов, поддержанных РФФИ и Министерством образования и науки РФ по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». На протяжении ряда лет А.В. Абанин возглавлял диссертационные советы (в настоящее время – диссертационный совет 801.01.02 по научным специальностям «Вещественный, комплексный и функциональный анализ» и «Дифференциальные уравнения и математическая физика»), входит в состав редколлегии периодических изданий «Владикавказский математический журнал» и «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Те, кому удавалось хоть недолго общаться с Александром Васильевичем, не могли не заметить таких определяющих особенностей характера, как поразительная цельность, надёжность, отсутствие равнодушия, доброжелательное отношение к коллегам, неприятие любой разновидности лжи.

Сохраняя верность традициям российской науки и образования, не изменяя себе и сформировавшейся в студенческие годы активной жизненной позиции, Александр Васильевич Абанин является сегодня образцом учёного, педагога и человека. От всей души поздравляем Александра Васильевича и желаем ему здоровья, радости в жизни и новых творческих достижений!

Ю.С. Налбандян

Редакция и редакционная коллегия журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» сердечно поздравляют Александра Васильевича, многолетнего автора и добросовестного члена редколлегии нашего журнала, с юбилеем и желают ему здоровья, счастья и творческих успехов на благо просвещения!

Personalities

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-147-148>

Владимир Исаакович Минкин (к 90-летию)

Vladimir Isaakovich Minkin (to the 90th Anniversary)



Научному руководителю Южного федерального университета, профессору, доктору химических наук, академику Российской академии наук Владимиру Исааковичу Минкину исполнилось 90 лет.

Владимир Исаакович родился 4 марта 1935 г. в Ростов-на-Дону. В 1957 г. он окончил химический факультет Ростовского государственного университета. Трудовую деятельность начал с должности лаборанта кафедры химической технологии Новочеркасского химического института. В 1959 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1967-м получил звание профессора. Владимир Исаакович всю свою профессиональную жизнь посвятил Ростовскому государственному университету (ныне – Южный федеральный университет), пройдя долгий путь. С 1981 г. он возглавил Институт физической и органической химии, с 2003 года становится заместителем председателя Южного научного центра РАН. С 1994 г. – академик РАН. В последние годы Владимир Минкин руководит наукой в ЮФУ.

Владимир Исаакович внес большой вклад в развитие как российской, так и мировой науки. Он является выдающимся ученым с широким спектром научных интересов, одним из лидеров в области теоретической физической и органической химии. Созданные и развитые им научные направления многообразны и актуальны для мировой химической науки. В.И. Минкин входит в топ-30 российских самых цитируемых ученых мира. Основные его работы посвящены физической органической и квантовой химии, изучению строения и молекулярной динамики органических и металлоорганических соединений. В 1974 г. Владимир Минкин открыл (совместно с Л.П. Олехновичем и Ю.А. Ждановым) явление ацилотропии – быстрой обратимой миграции ацильных групп между нуклеофильными центрами в органических молекулах. Развил новое научное направление – химию структурно нежестких молекул в основном и возбужденном состояниях, разработал теорию орбитальной стабилизации «неклассических» структур органиче-

ских соединений. Исследовал таутомерию и фотохромизм органических соединений, стереодинамику координационных соединений, неклассические органические и элементоорганические структуры, бистабильные молекулярные системы с управляемыми светом обратимыми перегруппировками.

В.И. Минкин – член редколлегий многих журналов, в частности, «Успехи химии», «Журнал общей химии», «Журнал органической химии», «Известия РАН» (сер. хим.), «Химия гетероциклических соединений» и др. Редакционная коллегия нашего журнала серии «Естественные науки» также имеет честь видеть его в своих рядах.

Владимир Минкин имеет целый ряд государственных и международных наград, среди них – Государственная премия СССР (1989), Международная премия им. А. фон Гумбольдта (1999), премия им. А.М. Бутлерова РАН (2000), премия им. Л.А. Чугаева РАН (2003), премия им. А.Н. Несмеянова РАН (2010) и многие другие.

Коллектив редакции и редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» от всей души поздравляет Владимира Исааковича с 90-летием и выражает глубокую благодарность за многолетний вклад в развитие науки и образования. Желаем юбиляру крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и вдохновения для новых свершений на благо отечественной науки!

Над номером работали: Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, О.В. Назаренко, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко

Подписано в печать 27.03.2025. Выход в свет 31.03.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 17,20. Уч.-изд. л. 17,59. Тираж 250 экз. Заказ № 9923.

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

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

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

Magazine released: L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, O.V. Nazarenko, N.G. Shatravkina, M.S. Shipitko

Signed print March 27, 2025. The publication March 31, 2025. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 17,20. Publ. sign. 17,59. Edition 250 copies. Order number 9923.

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.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru