

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2025

4

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, 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 ВНЦ РАН, Россия
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия
Е.В. Абакумов – доктор биол. наук, профессор, профессор РАН, Санкт-Петербургский 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 физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
М.Ю. Жуков – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Н. Карапетянц – доктор физ.-мат. 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, Беларусь
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика
М.А. Сазыкина – доктор биол. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
В.И. Силаев – доктор геол.-мин. наук, Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Россия
В.Н. Труфанов – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
П. Фатталь – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хаванский – 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, Russian Academy of Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia
E.V. Abakumov - Doctor of Biology, Professor, Professor, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg 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 Biology, 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
D.V. Karelin - Doctor of Biology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Russia
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 Biology, Professor, Southern Federal University, Russia
Valerii I. Silaev - Doctor of Geology and Mineralogy, Komi Science Centre of the Ural Branch, 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. Khavanskiy - Candidate of Geology and Mineralogy, Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia

The Founders

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi: 10.18522/1026-2237-2025-4

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
Научный журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 4 (228) 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. 4 (228) 2025

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Ватульян А.О., Дударев В.В., Нестеров С.А.* Идентификация переменных термомеханических характеристик в классе полиномов для модели термоупругости..... 4
Маннаников Р.С. О существенной и ω -существенной нормах линейного оператора на весовых пространствах последовательностей..... 14
Хубежты Ш.С., Плиева Л.Ю. Квадратурные формулы для сингулярных интегралов на отрезке интегрирования с фиксированными узлами..... 20
Чебаков М.И., Колосова Е.М. Плоская контактная задача о взаимодействии упругого штампа с кусочно-однородной упругой конструкцией, лежащей на винклеровском основании..... 25

- Vatulyan A.O., Dudarev V.V., Nesterov S.A.* Identification of Variable Thermomechanical Characteristics in the Class of Polynomials for the Thermoelasticity Model 4
Mannanikov R.S. On the Essential and ω -Essential Norms of a Linear Operator in Weighted Sequence Spaces 14
Khubezhty Sh.S., Plieva L.Yu. Quadrature Formulas for Singular Integrals on a Fixed-Node Integration Segment 20
Chebakov M.I., Kolosova E.M. Plane Contact Problem of Interaction of an Elastic Stamp with a Piecewise-Homogeneous Elastic Structure Laying on a Winkler Foundation..... 25

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

- Ашабоков Б.А., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Барекова М.В., Кешева Л.А., Теунова Н.В.* Адаптация системы производства сельхозпродукции отраслевого уровня к изменению климата..... 34
Воробьев Н.В., Воробьев А.Н., Ипполитова Н.А. Развитие опорных городов Транссибирского экономического коридора 46
Дорошенко В.В., Болгов И.А. Динамика площади открытых песков на востоке Ставропольского края в 2022–2024 годы 55
Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Леонова Л.В. Минералогия шлаков Лялинского медного завода (село Караульское, Свердловская область) 63

- Ashabokov B.A., Kupovykh G.V., Tashilova A.A., Berekova M.V., Kesheva L.A., Teunova N.V.* Adaptation of Sector-Level Agriculture Production Systems to Climate Change..... 34
Vorobyev N.V., Vorobyev A.N., Ippolitova N.A. Development of the Pivot Cities of the Trans-Siberian Economic Corridor 46
Doroshenko V.V., Bolgov I.A. Dynamics of the Area of Open Sands in the East of the Stavropol Region in 2022-2024..... 55
Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Leonova L.V. Mineralogy of Slags from Lyalinsky Cooper Plant (Karaulskoye Village, Sverdlovsk Region) 63

<i>Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Александрова А.Б., Валиев В.С., Хасанов Р.Р.</i> Абиотические факторы в зарастании озер прибрежно-водной растительностью.....	72	<i>Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Alexandrova A.B., Valiev V.S., Khasanov R.R.</i> Abiotic Factors in the Overgrowth of Lakes by Coastal Aquatic Vegetation	72
<i>Ненашева Г.И., Копытина Т.М., Козырева Ю.В., Минакова А.Е.</i> Медоносные растения предгорных районов Алтайского края: возможности определения географического происхождения меда.....	83	<i>Nenasheva G.I., Kopytina T.M., Kozyreva Yu.V., Minakova A.E.</i> Honey-Bearing Plants of Mountainous Areas of the Altai Territory: Possibilities of Determining the Geographical Origin of Honey	83
<i>Соловьев И.А., Зольникова Ю.Ф., Щитова Н.А., Акинин Д.Г.</i> Территориальные особенности миграционных процессов в российских городах.....	94	<i>Soloviev I.A., Zolnikova J.F., Shchitova N.A., Akinin D.G.</i> Territorial Features of Migration Processes in Russian Cities	94
<i>Стребкова А.С., Карманова М.В., Ненашева Г.И.</i> Характеристика фаз весенне-летнего сезона года на примере территории Алтайского края.....	103	<i>Strebkova A.S., Karmanova M.V., Nenasheva G.I.</i> Characteristics of the Phases of the Spring-Summer Season on the Example of the Altai Territory	103
<i>Яицкая Н.А.</i> Районирование акваторий и берегов Азовского моря и Северного Каспия для оценки воздействия ансамблей опасных гидрометеорологических явлений.....	112	<i>Yaitskaya N.A.</i> Zoning of the Water Areas and Shore of the Sea of Azov and the Northern Caspian Sea to Assess the Impact of Hydrometeorological Multi-Hazards.....	112

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Бирюкова О.А., Ильченко Я.И., Ерин В.А.</i> Влияние технологии no-till на фосфатное состояние черноземов обыкновенных Ростовской области.....	125	<i>Biryukova O.A., Pchenko Ya.I., Erin V.A.</i> Impact of No-Till Technology on the Phosphate Status of Haplic Chernozems in Rostov Region.....	125
<i>Мазанко М.С., Праздниова Е.В., Амирджанов Ф.Ф., Брень А.Б., Емельянцева С.А.</i> Механизмы формирования и контроля растениями ризосферной микробиоты: современные представления о взаимодействии в системе растение – микроорганизм.....	132	<i>Mazanko M.S., Prazdnova E.V., Amirdzhanov F.F., Bren A.B., Emelyantsev S.A.</i> Mechanisms of Formation and Control of the Rhizosphere Microbiota by Plants: Current Understanding of Plant-Microorganism Interactions.....	132
<i>Сухомлинова В.Н., Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Русева А.С.</i> Изменение щелочно-кислотных свойств почв при загрязнении разными соединениями лития.....	150	<i>Sukhomlinova V.N., Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Ruseva A.S.</i> Changes in the Alkaline-Acid Properties of Soils When Contaminated with Various Lithium Compounds.....	150
<i>Чистяков В.А., Савенков Д.Н., Суханов М.К., Брень А.Б.</i> Принципы организации вычислений в эукариотических, прокариотических клетках и бактериальных биопленках и их применение в кибернетических системах: перспективы кибербионики	157	<i>Chistyakov V.A., Savenkov D.N., Sukhanov M.K., Bren A.B.</i> Principles of Computation Organisation in Eukaryotic and Procaryotic Cells and Bacterial Biofilms and Their Application in Cybernetic Systems: Prospects for Cyberbiology.....	157

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

<i>Минкина Т.М., Решетняк О.С.</i> Международная научная конференция «Водосбор – река – устье: исследования эрозии почв, русловых и устьевых процессов» (г. Ростов-на-Дону, 15–18 сентября 2025 года)	164	<i>Minkina T.M., Reshetnyak O.S.</i> International Scientific Conference “Catchment-river-estuary: studies of soil erosion, channel and estuary processes” (Rostov-on-Don, September 15-18, 2025).....	164
<i>Миноранский В.А., Тимофеев Ю.В.</i> 30 лет на службе охраны природы (биосферному заповеднику «Ростовский» – 30 лет).....	168	<i>Minoransky V.A., Timofeenko Yu.V.</i> 30 years in the Service of Nature Conservation (Rostov Biosphere Reserve - 30th Anniversary).....	168

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

<i>Назаренко О.В., Михайленко А.В., Доценко И.В., Кузнецов А.Н.</i> Юрий Александрович Федоров (к 80-летию).....	171	<i>Nazarenko O.V., Mikhailenko A.V., Dotsenko I.V., Kuznetsov A.N.</i> Yuri Aleksandrovich Fedorov (to the 80th Anniversary).....	171
--	-----	---	-----

Указатель материалов, опубликованных в журнале «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2025 г.	174	Index of Articles Published in the Journal “Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science” in 2025	174
---	-----	--	-----

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 539.3

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-4-13>ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
В КЛАССЕ ПОЛИНОМОВ ДЛЯ МОДЕЛИ ТЕРМОУПРУГОСТИ

Александр Ованесович Ватульян¹, Владимир Владимирович Дударев²,
Сергей Анатольевич Нестеров^{3✉}

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

³ Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия

¹ aovatulyan@sfnu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0444-4496>

² dudarev_vv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>

³ 1079@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3780-5104>

Аннотация. Современные технологии позволяют создавать функционально-градиентные материалы, материальные свойства которых обычно изменяются по степенным законам. Актуальной задачей механики деформируемого твердого тела является идентификация материальных характеристик таких материалов. При этом общий подход приводит к достаточно сложной процедуре. В настоящей работе поиск искоемых функций реализован в классе полиномов. Исследована задача идентификации переменных свойств колеблющегося неоднородного термоупругого стержня по дополнительной информации, измеренной в области действия нагрузки. Прямая задача решается методом конечных элементов в пакете FlexPDE. Проведена верификация решения прямой задачи для однородного стержня, исследована чувствительность дополнительной информации к материальным функциям, входящим в модель. Для нахождения термомеханических характеристик в виде полиномиальных функций предложен проекционно-итерационный подход. В ходе итерационного процесса коэффициенты полиномов уточнялись путем решения системы алгебраических уравнений, возникшей в результате дискретизации операторных уравнений 1-го рода. Начальное приближение задавалось среди констант как среднее максимального и минимального значений материальных характеристик, которые считались известными из априорной информации о восстанавливаемой характеристике. Далее происходило поэтапное уточнение в классе констант, линейных и квадратичных функций. Предложенный подход обладает преимуществами в виде быстрой сходимости итерационной схемы на каждом этапе реконструкции, быстроты решения прямой задачи, высокой точности реконструкции.

Ключевые слова: термоупругость, стержень, конечно-элементный пакет FlexPDE, коэффициентная обратная задача, идентификация, операторное уравнение 1-го рода, итерационно-проеекционный подход, коэффициент теплопроводности, модуль Юнга

Для цитирования: Ватульян А.О., Дударев В.В., Нестеров С.А. Идентификация переменных термомеханических характеристик в классе полиномов для модели термоупругости // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 4–13. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-4-13>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00265-П, <https://rscf.ru/project/22-11-00265/>, в Южном федеральном университете.

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

© Ватульян А.О., Дударев В.В., Нестеров С.А., 2025

Original article

IDENTIFICATION OF VARIABLE THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS IN THE CLASS OF POLYNOMIALS FOR THE THERMOELASTICITY MODEL

Alexander O. Vatulyan¹, Vladimir V. Dudarev², Sergey A. Nesterov³✉

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

³ Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

¹ aovatulyan@sfdedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0444-4496>

² dudarev_vv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>

³ 1079@list.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3780-5104>

Abstract. Modern technologies allow creating functionally graded materials whose material properties usually vary according to power laws. Therefore, an urgent problem of mechanics of deformable solids is the identification of material characteristics of such materials. In this case, the general approach leads to a rather complex procedure. Therefore, in this paper, the search for the desired functions is implemented in the class of polynomials. A study is carried out of the problem of identifying variable properties of an oscillating inhomogeneous thermoelastic rod using additional information measured in the load region. The direct problem is solved by the finite element method in the FlexPDE package. The solution to the direct problem for a homogeneous rod is verified, and the sensitivity of additional information to the material functions included in the model is investigated. A projection-iteration approach is proposed to find thermomechanical characteristics in the form of polynomial functions. During the iteration process, the coefficients of the polynomials were refined by solving a system of algebraic equations that arose as a result of discretization of the operator equations of the first kind. The initial approximation was set among the constants as the average value of the maximum and minimum values of the material characteristics, which were considered known from a priori information about the reconstructed characteristic. Then, a step-by-step refinement was performed in the class of constants, linear functions, quadratic functions. The proposed approach has the advantages of fast convergence of the iterative scheme at each stage of reconstruction, speed of solution of the direct problem, and high accuracy of reconstruction.

Keywords: thermoelasticity, rod, finite element package FlexPDE, coefficient inverse problem, identification, operator equation of the first kind, iterative-projection approach, thermal conductivity coefficient, Young's modulus

For citation: Vatulyan A.O., Dudarev V.V., Nesterov S.A. Identification of Variable Thermomechanical Characteristics in the Class of Polynomials for the Thermoelasticity Model. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):4-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-4-13>

Acknowledgements: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-11-00265-P, <https://rscf.ru/en/project/22-11-00265/>, at the Southern Federal University.

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

Введение

Интерес к функционально-градиентным материалам (ФГМ), свойства которых непрерывно меняются по пространственным координатам, связан с возможностью создания на их основе теплозащитных и износостойких покрытий, деталей режущих инструментов, лопаток газовых турбин, биоимплантатов [1–3]. Объекты, изготовленные из ФГМ, в качестве преимуществ по сравнению со слоистыми материалами не имеют выраженных концентраторов, что приводит к снижению вероятности появления трещин и отслоений [4].

Создание контролируемого распределения термомеханических характеристик происходит на основе технологического процесса, этапами которого обычно выступают спекание, плавление, послойное прессование и напыление [5]. Объекты из ФГМ для обеспечения эффективного

управления технологическими процессами при их изготовлении должны иметь достаточно простые законы изменения по координатам, например степенные или экспоненциальные [6, 7].

В настоящее время термомеханическое поведение ФГМ достаточно хорошо исследовано с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [7–9] и других численных методов (Галёркина [10], сведения к системе интегральных уравнений Фредгольма (ИУФ) 2-го рода [11], пристрелки [12]). Для удобной реализации МКЭ созданы различные конечно-элементные пакеты (КЭ-пакеты), в частности FreeFem++, ANSYS, FlexPDE и др. К их преимуществам относятся возможность применения к объектам с различной геометрией и быстрота решения. Кроме того, некоторые КЭ-пакеты, например FreeFem++, являются свободно распространяемыми.

Для осуществления контроля качества конструкций из неоднородных материалов требуются надежные технологии идентификации их материальных свойств, теоретические основы которых разрабатываются при решении модельных коэффициентных обратных задач (КОЗ) термоупругости [13, 14]. Как правило, обратные задачи решаются путем минимизации функционала невязки с помощью градиентных [15–17] либо эвристических методов, например нейронных сетей [18–20]. Недостатки применения нейронных сетей: нахождение локального минимума вместо глобального, сложность обучения, плохая масштабируемость по мере увеличения объема данных, большие временные затраты для многоциклового настроя элементов модели.

В [21–23] разработан альтернативный итерационный подход к решению нелинейной КОЗ, на каждой итерации которого решается прямая задача и ИУФ 1-го рода. Это позволяет восстанавливать значения функций неоднородности в различных классах функций в точках сетки продольной координаты. Однако недостатком данного подхода является большая затрата машинного времени.

Для решения КОЗ термоупругости в данной работе предложен проекционно-итерационный подход. Термомеханические характеристики в ходе итерационного процесса поэтапно уточняются в классе полиномиальных функций. При этом прямая задача решается в пакете FlexPDE. Проведены вычислительные эксперименты по отдельной реконструкции термомеханических характеристик.

Постановка и решение прямой задачи

Рассмотрим функционально-градиентный термоупругий стержень, один торец которого жестко закреплен и поддерживается при нулевой температуре, а на другом действует нестационарная тепловая либо механическая нагрузка.

Обезразмеренная постановка задачи о неустановившихся колебаниях неоднородного термоупругого стержня имеет вид [11]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{E}(z) \frac{\partial U}{\partial z} - \bar{\gamma}(z) W \right) &= \bar{\rho}(z) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{k}(z) \frac{\partial W}{\partial z} \right) &= \bar{c}(z) \frac{\partial W}{\partial \tau} + \delta_0 \bar{\gamma}(z) \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial \tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$U(0, \tau) = W(0, \tau) = 0, \quad -\bar{k}(1) \frac{\partial W}{\partial z}(1, \tau) = \phi(\tau), \quad W(z, 0) = U(z, 0) = \frac{\partial U}{\partial \tau}(z, 0) = 0.$$

Здесь z – продольная координата; τ – время; U – смещение; W – температура; \bar{E} – модуль Юнга; $\bar{\rho}$ – плотность; \bar{k} – коэффициент теплопроводности; \bar{c} – удельная теплоемкость; $\bar{\gamma}$ – коэффициент температурного напряжения; δ_0 – параметр связанности; $\phi(\tau)$ – тепловая нагрузка; $\psi(\tau)$ – механическая нагрузка.

Прямая задача термоупругости для стержня состоит в нахождении полей смещения и температуры путем решения начально-краевой задачи (1) при заданных законах изменения термомеханических характеристик.

В обратной задаче требуется восстановить законы изменения термоупругих модулей из (1) по дополнительной информации на торце $z=1$ стержня: $W(1, \tau) = f(\tau)$, $\tau \in [a_1, a_2]$; $U(1, \tau) = g(\tau)$, $\tau \in [b_1, b_2]$.

Если материал неоднородный, то в общем случае можно получить только численное решение задачи термоупругости (1). В работах [11, 12, 21, 22] решение сначала строилось в трансформантах Лапласа на основе методов сведения к системе ИУФ 2-го рода либо пристрелки. Затем полученные решения в трансформантах обращались с помощью теории вычетов или метода Дурбина. Этот подход показал достаточно высокую точность, необходимую в дальнейшем при решении обратной задачи. Его недостаток – большие затраты машинного времени, связанные с вычислением оригиналов функций.

В настоящей работе рассмотрен более быстрый метод решения прямой задачи с помощью МКЭ, реализованного в пакете FlexPDE. Согласно особенностям пакета, при решении задач о неустановившихся колебаниях необходимо, кроме функций смещения, описывать еще и функцию скорости $V = \frac{\partial U}{\partial \tau}$. При этом решение задачи (1) состоит из объявления неизвестных $U, V,$

W ; задания материальных свойств, определяющих соотношений и начальных условий; математического описания системы дифференциальных уравнений; построения геометрии объекта с заданием граничных условий; вывода результатов с записью в текстовый файл для обмена данными с пакетом Maple, где решается обратная задача.

В ходе вычислений выяснилось, что решение прямой задачи термоупругости для стержня в пакете FlexPDE требует в 10–15 раз меньше машинного времени по сравнению с решениями, полученными в работе [21].

Для проверки точности решения задачи (1) в пакете FlexPDE проведено сравнение КЭ-решения для однородного стержня с численно-аналитическим. Для получения аналитического решения сначала к (1) применяется преобразование Лапласа. Затем полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в трансформантах путём исключения температуры сводится к ОДУ 4-го порядка относительно смещения. Оно решается аналитически и обращается на основании метода Дурбина.

В таблице представлены значения смещения однородного стержня, вычисленные на торце $z = 1$ как аналитически, так и численно в пакете FlexPDE для некоторых моментов времени при $\delta_0 = 0,04$.

Торцевое смещение однородного стержня в различные моменты времени
 / End displacement of a homogeneous rod at different moments of time

Нагрузка	τ	Торцевое смещение		
		Аналитическое решение	МКЭ	Погрешность МКЭ, %
$H(\tau)$	0,05	0,049653	0,049311	0,69
	0,1	0,099994	0,100816	0,82
	0,15	0,149732	0,149369	0,24
	0,2	0,199986	0,201510	0,76
	0,25	0,249563	0,248841	0,29
	0,3	0,299991	0,301941	0,65
$\tau e^{-\tau}$	0,1	0,004620	0,004630	0,20
	0,2	0,017456	0,017372	0,48
	0,3	0,037076	0,036736	0,91
	0,4	0,060593	0,060920	0,54
	0,5	0,090301	0,089725	0,64
	0,6	0,121910	0,121524	0,32

Из таблицы следует, что относительная погрешность КЭ-решения меньше 1 % для различных моментов времени.

Согласно технологии изготовления ФГМ, обычно термомеханические характеристики представляют собой полиномиальные функции от пространственных координат [3–5]. Поэтому исследуем влияние степенных функций: а) $\bar{k}(z) = 1 - 0,8z^2$ – на температуру; б) $\bar{E}(z) = 1 + 2z + z^2$ –

на смещение в области действия нагрузки $z = 1$ при $\delta_0 = 0,04$ (рис. 1). Для однородного стержня графики температуры и смещения представлены сплошной линией, а для неоднородного – штрихпунктиром.

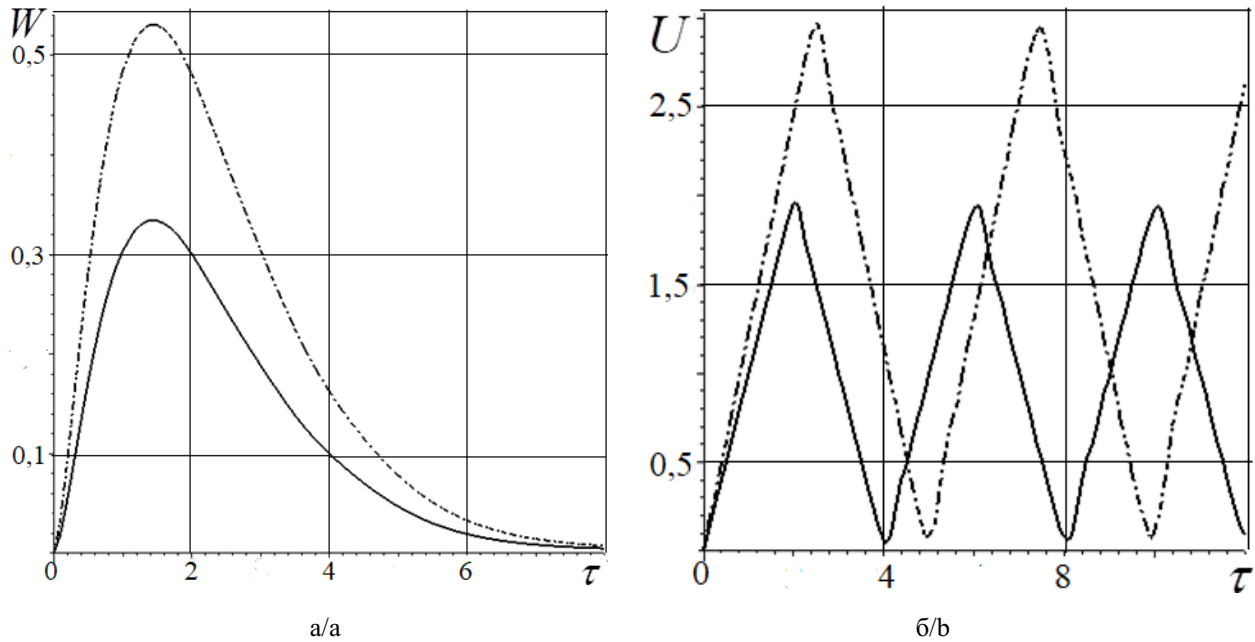


Рис. 1. Зависимость температуры W и смещения U от времени: а – $\bar{k}(z)=1-0,8z^2$, $\phi(\tau)=\tau e^{-\tau}$;
 б – $\bar{E}(z)=1+2z+z^2$, $\psi(\tau)=H(\tau)$, $H(\tau)$ – функция Хевисайда / Fig. 1. Dependence
 of temperature W and displacement U on time: а - $\bar{k}(z)=1-0,8z^2$, $\phi(\tau)=\tau e^{-\tau}$;
 б - $\bar{E}(z)=1+2z+z^2$, $\psi(\tau)=H(\tau)$, $H(\tau)$ - Heaviside function

Из рис. 1 следует, что торцевая температура и смещение в случае степенных законов неоднородности существенно отличаются от таковых для однородного стержня, поэтому такая информация может служить в качестве входной при решении КОЗ термоупругости.

Проекционно-итерационная схема решения обратной задачи

Для нахождения поправок термомеханических характеристик в итерационном процессе в [21, 22] были получены операторные уравнения (ИУФ 1-го рода):

$$\int_0^1 \delta \bar{k}^{(n-1)} \left(\frac{\partial W^{(n-1)}}{\partial z} \right)^2 dz + \int_0^1 \delta \bar{c}^{(n-1)} \frac{\partial W^{(n-1)}}{\partial \tau} W^{(n-1)} dz + \delta_0 \int_0^1 \delta \bar{\gamma}^{(n-1)} \frac{\partial V^{(n-1)}}{\partial z} W^{(n-1)} dz =$$

$$= \phi(\tau) \left(f(\tau) - W^{(n-1)}(1, \tau) \right), \quad \tau \in [a_1, a_2],$$

$$\int_0^1 \delta \bar{E}^{(n-1)} \left(\frac{\partial U^{(n-1)}}{\partial z} \right)^2 dz + \int_0^1 \delta \bar{\rho}^{(n-1)} \frac{\partial V^{(n-1)}}{\partial \tau} U^{(n-1)} dz - \int_0^1 \delta \bar{\gamma}^{(n-1)} \frac{\partial V^{(n-1)}}{\partial z} W^{(n-1)} dz =$$

$$= -\psi(\tau) \left(g(\tau) - U^{(n-1)}(1, \tau) \right), \quad \tau \in [b_1, b_2].$$

В случае раздельной идентификации термомеханических характеристик, например модуля Юнга, операторное уравнение при нагрузке $\psi(\tau)=H(\tau)$ примет вид

$$\int_0^1 \delta \bar{E}^{(n-1)} \left(\frac{\partial U^{(n-1)}}{\partial z} \right)^2 dz = U^{(n-1)}(1, \tau) - g(\tau), \quad \tau \in [b_1, b_2]. \quad (2)$$

Для выполнения условий выхода из итерационного процесса введем два функционала невязки в зависимости от способа нагружения – теплового или механического:

$$J_1 = \int_{a_1}^{a_2} (f(\tau) - W^{(n-1)}(1, \tau))^2 d\tau, \quad J_2 = \int_{b_1}^{b_2} (g(\tau) - U^{(n-1)}(1, \tau))^2 d\tau.$$

В [21] начальное приближение для запуска итерационного процесса реконструкции искалось в классе линейных функций. В ходе вычислительных экспериментов были восстановлены гипотетические законы неоднородности в различных классах функций в точках сетки значений продольной координаты.

Так как современные технологии позволяют создавать ФГМ со степенными законами изменения термомеханических характеристик, то модифицируем ранее разработанный подход [21], чтобы восстанавливать физико-механические характеристики в классе полиномов. Для этого, согласно проекционному методу, поправки к искомым функциям представим в виде разложения по системе полиномов. Например, для нахождения поправок модуля Юнга имеем

$$\delta \bar{E}(z) = \sum_{i=1}^N c_i \xi_i(z), \quad \xi_i(z) = z^{i-1}, \quad i = 1..N. \quad (3)$$

Подставив разложение (3) в (2), для поиска коэффициентов разложения $c_i^{(n-1)}$ на $(n-1)$ -й итерации получим следующую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_{i=1}^N c_i^{(n-1)} K_{ij}^{(n-1)} = P_j^{(n-1)}, \quad (4)$$

где $K_{ij}^{(n-1)} = \int_0^1 \xi_i(z) \left(\frac{\partial U^{(n-1)}}{\partial z}(z, \tau_j) \right)^2 dz, \quad P_j^{(n-1)} = U^{(n-1)}(1, \tau_j) - g(\tau_j), \quad i = 1..N, \quad j = 1..M.$

Полученная плохо обусловленная СЛАУ сводится к регуляризованной системе уравнений согласно методу А.Н. Тихонова [24].

В работе модифицированная процедура реконструкции состоит из 4 этапов. Рассмотрим ее на примере реконструкции модуля Юнга. На первом этапе находится начальное приближение как среднее минимального и максимального значений искомой функции, полученных из априорной информации о ней. После этого решается прямая задача в пакете FlexPDE для полученного значения термомеханической характеристики. На втором этапе решается СЛАУ (4) с одним членом в разложении (3), находится поправка для модуля Юнга $\delta \bar{E}^{(n-1)}$ среди констант. На третьем этапе характеристика ищется среди линейных функций с двумя членами в разложении (3), а на четвертом – среди квадратичных функций с тремя членами в (3). На каждом этапе происходит уточнение искомой характеристики в заданном классе функций по формуле $\bar{E}^{(n)} = \bar{E}^{(n-1)} + \delta \bar{E}^{(n-1)}$, пока $|J_i| < \varepsilon$ либо количество итераций не превысит $n = 20$. В случае реконструкции среди констант $\varepsilon = 10^{-2}$, в классе линейных функций – $\varepsilon = 10^{-4}$, в классе квадратичных функций – $\varepsilon = 10^{-5}$.

Результаты решения обратной задачи

Рассмотрим результаты восстановления термомеханических характеристик стержня на основе проекционно-итерационного подхода при $\delta_0 = 0,03$, $\phi(\tau) = H(\tau)$, $\psi(\tau) = H(\tau)$.

В результате вычислительных экспериментов выяснено, что погрешность реконструкции термомеханических характеристик не превосходит 3 %; для выхода из итерационного процесса в случае реконструкции монотонных функций требовалось не более 8 итераций, а немонотонных – 16; затраты машинного времени были в 15–20 раз меньше по сравнению с подходом, предложенным в [21].

На рис. 2, 3 изображены точная и восстановленные функции: сплошная линия – точная функция, пунктир – результаты реконструкции в виде константы, штрихпунктир – в виде линейной функции, точки – в виде квадратичной функции.

На рис. 2 представлена реконструкция монотонных функций. Временные интервалы наблюдения: $[a_1; a_2] = [0,04; 0,28]$, $[b_1; b_2] = [0,1; 0,56]$; при этом измерение входной информации проводилось в 4 точках внутри выбранных отрезков.

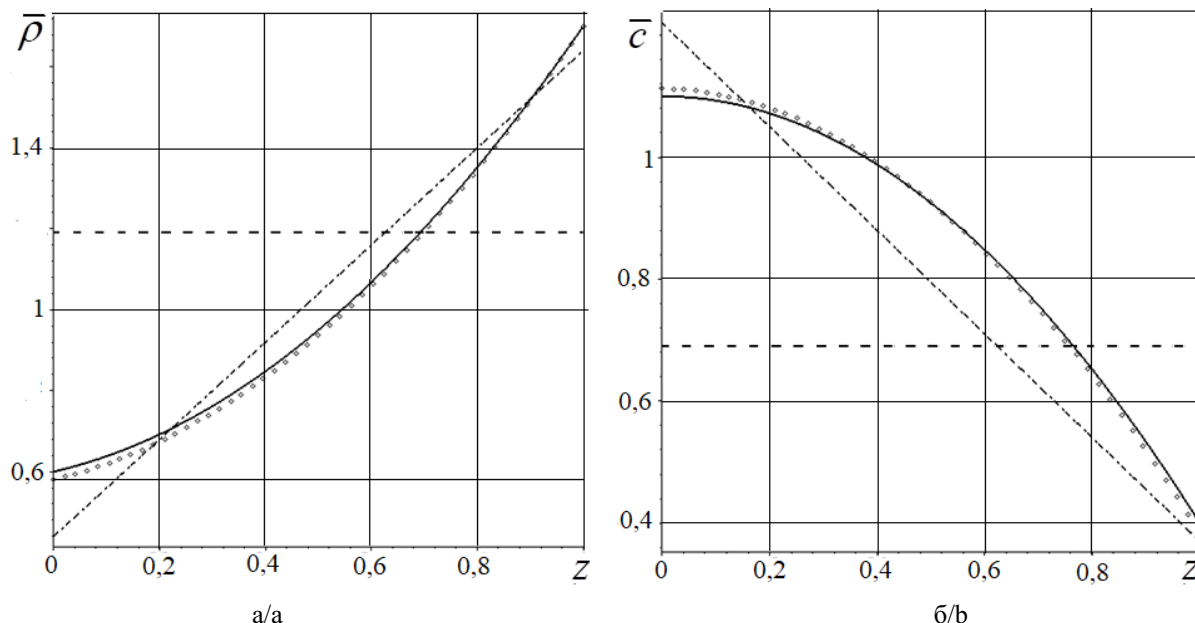


Рис. 2. Реконструкция монотонных функций: а - $\bar{\rho}(z) = 0,6 + 0,3z + 0,8z^2$; б - $\bar{c}(z) = 1,1 - 0,7z^2$
 / Fig. 2. Reconstruction of monotone functions: а - $\bar{\rho}(z) = 0,6 + 0,3z + 0,8z^2$; б - $\bar{c}(z) = 1,1 - 0,7z^2$

На рис. 3 изображены итоги реконструкции немонотонных законов изменения термомеханических характеристик. Временные интервалы наблюдения: $[a_1; a_2] = [0,02; 0,52]$, $[b_1; b_2] = [0,06; 0,82]$; при этом измерение входной информации проводилось в 7 точках внутри выбранных отрезков.

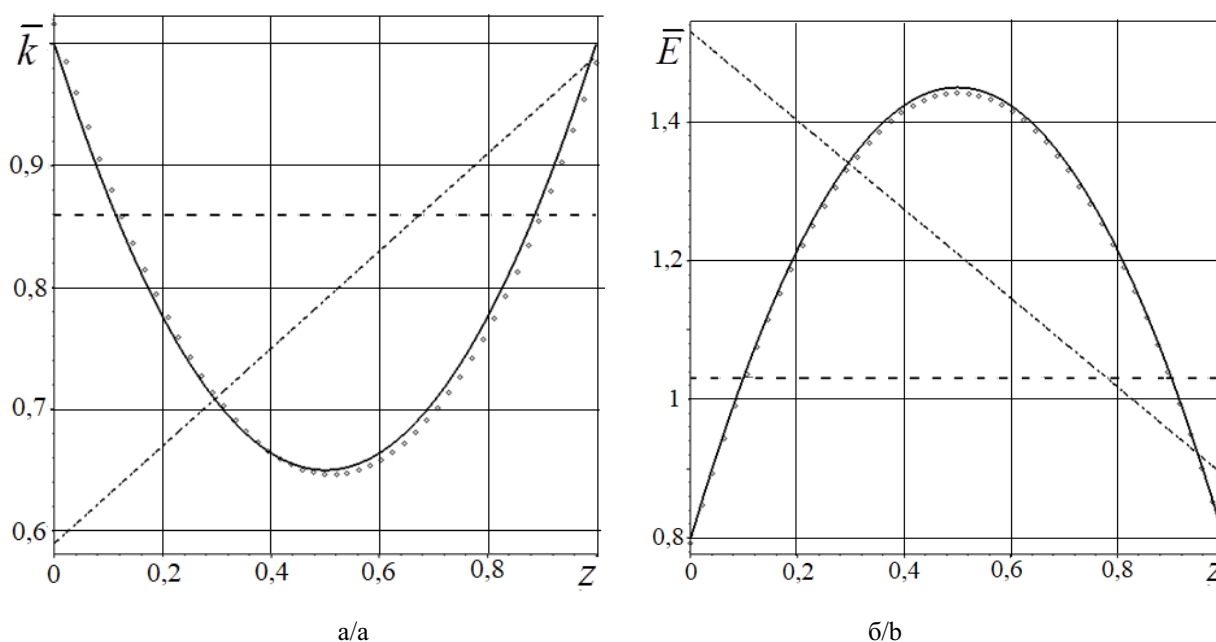


Рис. 3. Реконструкция немонотонных функций: а - $\bar{k}(z) = 1,4z^2 - 1,4z + 1$; б - $\bar{E}(z) = -2,6z^2 + 2,6z + 0,8$
 / Fig. 3. Reconstruction of non-monotonic functions: а - $\bar{k}(z) = 1,4z^2 - 1,4z + 1$; б - $\bar{E}(z) = -2,6z^2 + 2,6z + 0,8$

Заключение

Предложена проекционно-итерационная схема идентификации термомеханических характеристик неоднородного стержня в классе степенных функций. Численное решение прямой задачи получено с помощью МКЭ в пакете FlexPDE. Решение обратной задачи состояло из 4 этапов. На первом этапе находилось начальное приближение как среднее минимального и максимального значений искомой функции, на втором – поправки среди констант, на третьем – среди линейных функций, на четвертом – среди квадратичных функций.

Выяснено, что модифицированный подход имеет преимущества перед предложенным в [21]: универсальность; затраты машинного времени на решение прямой задачи в 10–15 раз меньше; итерационная схема реконструкции сходится быстрее; точность реконструкции для рассмотренных законов неоднородности на последнем этапе выше на 1–3 %.

Следует отметить, что предложенный проекционно-итерационный подход позволяет восстанавливать только гладкие функции, которые хорошо аппроксимируются полиномами.

Данная проекционно-итерационная схема может служить в качестве теоретической базы неразрушающего контроля термоупругих элементов с целью уточнения их функционально-градиентных свойств

Список источников

1. *Watari F., Yokoyama A., Omori M., Hirai T., Kondo H., Uo M., Kawasaki T.* Biocompatibility of materials and development to functionally graded implant for bio-medical application // *Composites Science and Technology*. 2004. Vol. 64, № 6. P. 893–908. EDN: KJNZLV. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.09.005>
2. *Miteva A., Bouzekova-Penkova A.* Some aerospace applications of functionally graded materials // *Aerospace Research in Bulgaria*. 2021. Vol. 33. P. 195–209. EDN: PCCJVT. <https://doi.org/10.3897/arb.v33.e14>
3. *Majid M., Masoud R., Majid G.* Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications // *Processing and Application of Ceramics*. 2021. Vol. 15, № 4. P. 319–343. EDN: UMMQAO. <https://doi.org/10.2298/PAC2104319M>
4. *Nemat-Alla M.* Reduction of thermal stresses by composition optimization of two-dimensional functionally graded materials // *Acta Mech*. 2009. Vol. 208. P. 147–161. EDN: ICAAHB. <https://doi.org/10.1007/s00707-008-0136-1>
5. *Naebe M., Shirvanimoghaddam K.* Functionally graded materials: a review of fabrication and properties // *Applied Materials Today*. 2016. Vol. 5. P. 223–245. EDN: YFCZGK. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001>
6. *Madan R., Bhowmick S.* Modeling of functionally graded materials to estimate effective thermo-mechanical properties // *World J. of Engineering*. 2022. Vol. 19, № 3. P. 291–301. EDN: MRSZPZ. <https://doi.org/10.1108/WJE-09-2020-0445>
7. *Noda N.* Thermal stresses in functionally graded materials // *J. of Thermal Stresses*. 1999. Vol. 22, № 4–5. P. 477–512. <https://doi.org/10.1080/014957399280841>
8. *Reddy J.N., Chin C.D.* Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plates // *J. of Thermal Stresses*. 1998. Vol. 21, № 6. P. 593–626. <https://doi.org/10.1080/01495739808956165>
9. *Ootao Y., Tanigawa Y.* Transient thermoelastic problem of functionally graded thick strip due to nonuniform heat supply // *Compos. Struct*. 2004. Vol. 63, № 2. P. 139–146. EDN: KULQQB. [https://doi.org/10.1016/s0263-8223\(03\)00142-9](https://doi.org/10.1016/s0263-8223(03)00142-9)
10. *Ching H.K., Yen S.C.* Meshless local Petrov-Galerkin analysis for 2D functionally graded elastic solids under mechanical and thermal loads // *Compos. Part B: Engineering*. 2005. Vol. 36, № 3. P. 223–240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.09.007>
11. *Ватульян А.О., Нестеров С.А.* Об одном подходе к восстановлению неоднородных свойств термоупругих тел // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2012. № 4 (170). С. 25–29. EDN: PCIYLT.
12. *Ватульян А.О., Нестеров С.А.* Решение обратной задачи об идентификации двух термомеханических характеристик функционально-градиентного стержня // *Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2022. Т. 22, № 2. С. 180–195. EDN: ОТАJWA. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-2-180-195>
13. *Sinitisa A.V., Capsoni A.* Design of novel inverse analysis methodology for exact estimation of elasticity parameters in the thermoelastic stress model // *International Communication in Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 135, № 3. Art. 106096. EDN: DKDHHV. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106096>
14. *Нестеров С.А.* Некоторые задачи идентификации физико-механических характеристик неоднородных тел при тепловом нагружении // *Экол. вестн. науч. центров Черномор. эконом. сотрудничества*. 2025. Т. 22, № 3. С. 13–23. EDN: HVZNRK. <https://doi.org/10.31429/vestnik-22-3-13-23>

15. *Lukasiewicz S.A., Babaei R., Qian R.E.* Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects // *J. of Thermal Stresses*. 2003. Vol. 26, № 1. P. 13–23. <https://doi.org/10.1080/713855763>
16. *Araki N., Tang D.W., Ohtani A.* Evaluation of Thermophysical Properties of Functionally Graded Materials // *Int. J. Thermophys.* 2006. Vol. 27. P. 209–219. <https://doi.org/10.1007/s10765-006-0034-5>
17. *Zhang L., Yang H.* Numerical modeling of inverse problem of parameter identification for viscoelastic functionally graded materials/structures // *Engineering Computations*. 2021. Vol. 38, № 10. P. 3809–3835. EDN: JXXXLM. <https://doi.org/10.1108/EC-08-2020-0426>
18. *He Z., Ni F., Wang W., Zhang J.* A physics-informed deep learning method for solving direct and inverse heat conduction problems of materials // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 28. Art. 102719. EDN: VNWDXC. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102719>
19. *Yin W., Yang Z., Meng P.* Solving Inverse Scattering Problem with a Crack in Inhomogeneous Medium Based on a Convolutional Neural Network // *Symmetry*. 2023. Vol 15, № 1. Art. 119. EDN: KTWIEW. <https://doi.org/10.3390/sym15010119>
20. *Diligenskaya A., Samokish A.* Parametric Identification of Technological Thermophysics Processes Based on Neural Network Approach // *J. Vibroeng.* 2021. Vol. 23, № 6. P. 1407–1417. EDN: JPONLQ. <https://doi.org/10.21595/jve.2021.22075>
21. *Nedin R., Nesterov S., Vatulyan A.* On an inverse problem for inhomogeneous thermoelastic rod // *Int. J. of Solids and Structures*. 2014. Vol. 51, № 3–4. P. 767–773. EDN: SKKPXN. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.11.003>
22. *Ватульян А.О., Нестеров С.А.* Исследование обратных задач термоупругости для неоднородных материалов // *Владикавказский мат. журн.* 2022. Т. 24, № 2. С. 75–84. EDN: QLIZGL. <https://doi.org/10.46698/v3482-0047-3223-o>
23. *Ватульян А.О., Варченко А.А., Юров В.О.* Исследование коэффициентных обратных задач с учетом реологии для функционально-градиентных стержней // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2023. № 3. С. 4–12. EDN: HMBCSH. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-4-12>
24. *Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 232 с.

References

1. *Watari F., Yokoyama A., Omori M., Hirai T., Kondo H., Uo M., Kawasaki T.* Biocompatibility of materials and development to functionally graded implant for bio-medical application. *Composites Science and Technology*. 2004;64(6):893-908. EDN: KJNZLV. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.09.005>
2. *Miteva A., Bouzekova-Penkova A.* Some aerospace applications of functionally graded materials. *Aerospace Research in Bulgaria*. 2021;33:195-209. EDN: PCCJVT. <https://doi.org/10.3897/arb.v33.e14>
3. *Majid M., Masoud R., Majid G.* Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications. *Processing and Application of Ceramics*. 2021;15(4):319-343. EDN: UMMQAO. <https://doi.org/10.2298/PAC2104319M>
4. *Nemat-Alla M.* Reduction of thermal stresses by composition optimization of two-dimensional functionally graded materials. *Acta Mech.* 2009;208:147-161. EDN: ICAAHB. <https://doi.org/10.1007/s00707-008-0136-1>
5. *Naebe M., Shirvanimoghaddam K.* Functionally graded materials: a review of fabrication and properties. *Applied Materials Today*. 2016;5:223-245. EDN: YFCZGK. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001>
6. *Madan R., Bhowmick S.* Modeling of functionally graded materials to estimate effective thermo-mechanical properties. *World J. of Engineering*. 2022;19(3):291-301. EDN: MRSZPZ. <https://doi.org/10.1108/WJE-09-2020-0445>
7. *Noda N.* Thermal stresses in functionally graded materials. *Journal of Thermal Stresses*. 1999;22(4-5):477-512. <https://doi.org/10.1080/014957399280841>
8. *Reddy J.N., Chin C.D.* Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plates. *J. of Thermal Stresses*. 1998;21(6):593-626. <https://doi.org/10.1080/01495739808956165>
9. *Ootao Y., Tanigawa Y.* Transient thermoelastic problem of functionally graded thick strip due to nonuniform heat supply. *Compos. Struct.* 2004;63(2):139-146. EDN: KULQQB. [https://doi.org/10.1016/s0263-8223\(03\)00142-9](https://doi.org/10.1016/s0263-8223(03)00142-9)
10. *Ching H. K., Yen S. C.* Meshless local Petrov-Galerkin analysis for 2D functionally graded elastic solids under mechanical and thermal loads. *Compos. Part B: Eng.* 2005;36(3):223-240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.09.007>
11. *Vatulyan A.O., Nesterov S.A.* On one approach to restoring non-uniform properties of thermoelastic bodies. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2012;(4):25-29. (In Russ.). EDN: PCIYLT.

12. Vatulyan A.O., Nesterov S.A. Solution of the inverse problem of identification of two thermomechanical characteristics of a functionally graded rod. *Bulletin of the Saratov University. Mathematics. Mechanics. Computer Science.* 2022;22(2):180-195. (In Russ.). EDN: OТАJWA. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-2-180-195>
13. Sinita A.V., Capsoni A. Design of novel inverse analysis methodology for exact estimation of elasticity parameters in thermoelastic stress model. *International Communication in Heat and Mass Transfer.* 2022;135(3):106096. EDN: DKDHHV. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106096>
14. Nesterov S.A. Some problems of identification of physical and mechanical characteristics of inhomogeneous bodies under thermal loading. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation.* 2025;22(3):13-23. (In Russ.). EDN: HVZNRK. <https://doi.org/10.31429/vestnik-22-3-13-23>
15. Lukasiewicz S.A., Babaei R., Qian R.E. Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects. *J. of Thermal Stresses.* 2003;26(1):13-23. <https://doi.org/10.1080/713855763>
16. Araki N., Tang D.W., Ohtani A. Evaluation of thermophysical properties of functionally graded materials. *Int. J. Thermophys.* 2006;27:209-219. <https://doi.org/10.1007/s10765-006-0034-5>
17. Zhang L., Yang H. Numerical modeling of inverse problem of parameter identification for viscoelastic functionally graded materials/structures. *Engineering Computations.* 2021;38(10):3809-3835. EDN: JXXXLM. <https://doi.org/10.1108/EC-08-2020-0426>
18. He Z., Ni F., Wang W., Zhang J. A physics-informed deep learning method for solving direct and inverse heat conduction problems of materials. *Materials Today Communications.* 2021;28:102719. EDN: VNWDXC. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102719>
19. Yin W., Yang Z., Meng P. Solving Inverse Scattering Problem with a Crack in Inhomogeneous Medium Based on a Convolutional Neural Network. *Symmetry.* 2023;15(1):119. EDN: KTWIEW. <https://doi.org/10.3390/sym15010119>
20. Diligenskaya A., Samokish A. Parametric Identification of Technological Thermophysics Processes Based on Neural Network Approach. *J. Vibroeng.* 2021;23(6):1407-1417. EDN: JPONLQ. <https://doi.org/10.21595/jve.2021.22075>
21. Nedin R., Nesterov S., Vatulyan A. On an inverse problem for inhomogeneous thermoelastic rod. *Int. J. Solids Struct.* 2014;51(3-4):767-773. EDN: SKKPXN. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.11.003>
22. Vatulyan A.O., Nesterov S.A. Study of the Inverse Problems of Thermoelasticity for Inhomogeneous Materials. *Vladikavkaz Mathematical Journal.* 2022;24(2):75-84. (In Russ.). EDN: QLIZGL. <https://doi.org/10.46698/v3482-0047-3223-o>
23. Vatulyan A.O., Varchenko A.A., Yurov V.O. Investigation of Coefficient Inverse Problems Taking into Account Rheology for Functionally Graded Material. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):4-12. (In Russ.). EDN: HMBCSH. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-4-12>
24. Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. *Numerical methods for solving ill-posed problems.* Moscow: Science; 1990. 232 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.О. Ватульян – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

В.В. Дударев – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории упругости Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

С.А. Нестеров – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений ЮМИ – филиала ВНИЦ РАН.

Information about the authors

A.O. Vatulyan – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, SFedU.

V.V. Dudarev – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, SFedU.

S.A. Nesterov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Department of Differential Equations, SMI - Branch of the VSC RAS.

*Статья поступила в редакцию 11.06.2025; одобрена после рецензирования 02.07.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 11.06.2025; approved after reviewing 02.07.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Научная статья
УДК 517.9
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-14-19>

О СУЩЕСТВЕННОЙ И ω -СУЩЕСТВЕННОЙ НОРМАХ ЛИНЕЙНОГО ОПЕРАТОРА НА ВЕСОВЫХ ПРОСТРАНСТВАХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Роман Сергеевич Маннаников

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
mannanikov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3927-5561>

Аннотация. Исследование существенной и ω -существенной норм линейных непрерывных операторов в квазибанаховых весовых пространствах последовательностей $l^p(w)$ направлено на обобщение классических результатов на случай пространств с $0 < p < 1$. Ранее аналогичные задачи решались для гильбертовых ($p = 2$) и банаховых ($p > 1$) пространств. Однако квазибанахов случай ($0 < p < 1$) оставался недостаточно изученным, несмотря на его теоретическую и прикладную значимость. Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью унификации методов вычисления существенных норм операторов для всей шкалы пространств. Это является критичным для развития спектральной теории и приложений численных методов в разреженном восстановлении данных и сжатии сигналов. Цель исследования – проверка гипотезы о равенстве существенной и ω -существенной норм для произвольного ω -непрерывного оператора в квазибанаховых пространствах. Данный вопрос оставался открытым после получения формул их вычисления для оператора весовой композиции в банаховой ($p > 1$) и частично в квазибанаховой ситуациях ($0 < p < 1$). В настоящей работе получены новые формулы для вычисления существенной и ω -существенной норм в предельной форме через последовательности проекторов. В перспективе это даст инструменты для контроля погрешности в аппроксимациях, таких как оценка резольвенты оператора, напрямую зависящей от его существенной нормы. Главным результатом является доказательство равенства существенной и ω -существенной норм для ω -непрерывных операторов в квазибанаховых пространствах, что подтверждает выдвинутую ранее гипотезу. В качестве приложения обобщены известные результаты о нормах оператора весовой композиции для всей шкалы ($0 < p < \infty$).

Ключевые слова: квазибанаховы пространства, пространства числовых последовательностей, существенная норма линейных операторов

Для цитирования: Маннаников Р.С. О существенной и ω -существенной нормах линейного оператора на весовых пространствах последовательностей // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 14–19. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-14-19>

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

Original article

ON THE ESSENTIAL AND ω -ESSENTIAL NORMS OF A LINEAR OPERATOR IN WEIGHTED SEQUENCE SPACES

Roman S. Mannanikov

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
mannanikov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3927-5561>

© Маннаников Р.С., 2025

Abstract. The study of essential and ω -essential norms of linear continuous operators in quasi-Banach weighted sequence spaces $l^p(w)$ aims to generalize classical results to the case of spaces with $0 < p < 1$. Previously, similar problems were addressed for Hilbert ($p = 2$) and Banach ($p > 1$) spaces. However, the quasi-Banach case ($0 < p < 1$) remained insufficiently explored despite its theoretical and practical significance. The relevance of this work lies in the need to unify methods for computation essential norms of operators across the entire scale of spaces, which is crucial for advancing spectral theory and applications in sparse data recovery and signal compression. The primary goal of the research is to verify the hypothesis on the equality of essential and ω -essential norms for arbitrary ω -continuous operators in quasi-Banach spaces. This question remained open after the derivation of formulas for weighted composition operators norms in Banach ($p > 1$) and partially in quasi-Banach ($0 < p < 1$) cases. In the present work, new limit formulas for computing these norms through sequences of projectors were derived, proving future tools for error control in approximations, such as resolvent estimates dependent on the essential norm. The main result is the proof of equality of essential and ω -essential norms for ω -continuous operators in quasi-Banach spaces, confirming the previously stated hypothesis. As an application, the work generalizes known results on weighted composition operator norms to the entire scale ($0 < p < \infty$).

Keywords: quasi-Banach spaces, spaces of numerical sequences, essential norm of linear operators

For citation: Mannanikov R.S. On the Essential and ω -Essential Norms of a Linear Operator in Weighted Sequence Spaces. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):14-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-14-19>

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

Топологические свойства различных линейных операторов на весовых пространствах последовательностей $l^p(w)$ изучались в безвесовом ($w(n) = 1, n \in \mathbb{N}$) и весовом случаях. В [1] ($p = 1$) и [2] ($p \geq 1$) исследовался оператор сдвига, в [3] ($p > 1$) и [4] ($p = 1$) – оператор Чезаро, в [5] ($p = 2$) – оператор весовой композиции, в [6] для оператора весовой композиции ($0 < p < \infty$) получены критерии ограниченности, компактности и замкнутости образа, полное описание пар операторов, разность которых компактна; точная формула для ω -существенной нормы. Показано, что для $l^p(w)$ ($p > 1$) существенная и ω -существенная нормы этого оператора совпадают, однако при $0 < p \leq 1$ справедливость этого утверждения не установлена и, более того, возник вопрос о справедливости этого равенства для произвольного ω -непрерывного оператора ($0 < p < \infty$). Настоящая статья посвящена поиску ответа на этот вопрос.

Напомним необходимые для дальнейшего сведения. Обозначим через ω пространство всех последовательностей $\mathbb{C}^{\mathbb{N}}$, наделенное топологией покоординатной сходимости. Пусть $w = (w(k))_{k=1}^{\infty}$ – фиксированная последовательность положительных чисел. При каждом $p \in (0, \infty)$ она задаёт весовое пространство последовательностей комплексных чисел $l^p(w) := \{x = (x_k) \in \omega : \|x\|_{p,w}^p := \sum_{k=1}^{\infty} |x_k|^p w^p(k) < \infty\}$.

Это пространство с нормой $\|\cdot\|_{p,w}$ при $p \geq 1$ и $p = 2$ является банаховым и гильбертовым соответственно. При $p \in (0, 1)$ $l^p(w)$ – квазибанахово, а $\|\cdot\|_{p,w}$ – квазинорма.

Пусть X и Y – квазибанаховы пространства, непрерывно вложенные в ω , $\mathcal{L}(X, Y)$ – пространство всех линейных непрерывных операторов из X в Y . Символы $(X, \omega), (Y, \omega)$ используются для пространств X и Y , наделённых топологией, индуцированной из ω . Следуя [6], будем говорить, что линейный оператор $L: X \rightarrow Y$ ω -непрерывен, если из того, что $(x^{(m)})_{m=1}^{\infty}$ – такая ограниченная в X последовательность, что $x^{(m)} \rightarrow x$ в (X, ω) , следует, что $Lx^{(m)} \rightarrow Lx$ в (Y, ω) . Через $\mathcal{L}_{\omega}(X, Y)$ обозначено множество всех ω -непрерывных операторов из X в Y . В случае, когда $X = Y$, используем обозначения $\mathcal{L}(X) := \mathcal{L}(X, X)$ и $\mathcal{L}_{\omega}(X) := \mathcal{L}_{\omega}(X, X)$. В [6] отмечено, что всегда $\mathcal{L}_{\omega}(X, Y) \subset \mathcal{L}(X, Y)$, т.е. всякий ω -непрерывный линейный оператор непрерывен. Там же указан пример оператора $L_0 \in \mathcal{L}(l^p(w)), 0 < p \leq 1$, который не является ω -непрерывным на $l^p(w)$. Множество всех точек единичной сферы в $l^p(w)$ и шар радиусом r с центром в точке x зададим в виде

$$B = \{x \in l^p(w) : \|x\|_{p,w} = 1\}, \quad B(x, r) = \{x \in l^p(w) : \|x\|_{p,w} \leq r\}.$$

Обозначим через $\mathcal{K}(X, Y)$ множество всех компактных операторов из X в Y , а через $\mathcal{K}_\omega(X, Y)$ – его подмножество, состоящее из ω -непрерывных операторов. В случае $X = Y$ используем символы $\mathcal{K}(X) := \mathcal{K}(X, X)$ и $\mathcal{K}_\omega(X) := \mathcal{K}_\omega(X, X)$. Существенная и ω -существенная квазинормы оператора $L \in \mathcal{L}(X, Y)$ задаются соотношениями $\|L\|_e = \inf_{K \in \mathcal{K}(X, Y)} \|L - K\|$ и $\|L\|_{\omega e} = \inf_{K \in \mathcal{K}_\omega(X, Y)} \|L - K\|$ соответственно.

Очевидно, что всегда

$$\|L\|_e \leq \|L\|_{\omega e} \leq \|L\|, L \in \mathcal{L}(X, Y). \quad (1)$$

В [6] установлено, что упомянутый выше оператор L_0 является компактным на $l^p(w)$, $0 < p \leq 1$, следовательно, $\|L_0\|_e = 0$. В то же время $\|L_0\|_{\omega e} = 1$. Таким образом, $\|L_0\|_e < \|L_0\|_{\omega e}$. Подчеркнем еще раз, что L_0 не является ω -непрерывным на $l^p(w)$, $0 < p \leq 1$.

В связи с вышеизложенным в [6] был поставлен следующий вопрос: для всякого ли ω -непрерывного оператора L на $l^p(w)$ имеет место равенство $\|L\|_e = \|L\|_{\omega e}$?

В настоящей статье даётся положительный ответ на этот вопрос. Более того, получены формулы для вычисления существенной и ω -существенной квазинорм произвольного оператора из $\mathcal{L}(l^p(w))$ и $\mathcal{L}_\omega(l^p(w))$ соответственно. В качестве следствия приведена также формула для вычисления существенной нормы весового оператора композиции для всей шкалы пространств $l^p(w)$, $p > 0$.

Предложение 1. Для любых линейных операторов $K \in \mathcal{K}_\omega(X, Y)$, $L \in \mathcal{L}_\omega(X, Y)$ справедливо равенство $\|L + K\|_{\omega e} = \|L\|_{\omega e}$.

Доказательство. Для любого $\tilde{K} \in \mathcal{K}_\omega(X, Y)$ имеем

$$\|L + K\|_{\omega e} = \inf_{\tilde{K} \in \mathcal{K}_\omega(X, Y)} \|L + K - \tilde{K}\| \leq \|L + K - (\tilde{K} + K)\| = \|L - \tilde{K}\|.$$

Переходя к инфимуму по $\tilde{K} \in \mathcal{K}_\omega(X, Y)$ получим $\|L + K\|_{\omega e} \leq \|L\|_{\omega e}$.

С другой стороны, для любого $\hat{K} \in \mathcal{K}_\omega(X, Y)$ выполняется соотношение

$$\|L + K - \hat{K}\| = \|L - (\hat{K} - K)\| \geq \inf_{C \in \mathcal{K}_\omega(X, Y)} \|L - C\| = \|L\|_{\omega e}.$$

Переходя к инфимуму по \hat{K} , получим обратное неравенство $\|L + K\|_{\omega e} \geq \|L\|_{\omega e}$.

Из предложения 1 и неравенства (1) вытекает

Следствие. Для любых операторов $K \in \mathcal{K}_\omega(X, Y)$ и $L \in \mathcal{L}_\omega(X, Y)$ справедливо неравенство $\|L + K\|_{\omega e} \leq \|L\|$.

Аналогичные утверждения можно сформулировать для существенной нормы в случае $L \in \mathcal{L}(X, Y)$ и $K \in \mathcal{K}(X, Y)$.

Предложение 2. Пусть $p \in (0, +\infty)$. Определим для любого $n \in \mathbb{N}$ последовательности линейных операторов $\{P_n\}$ и $\{R_n\}$ следующим образом: для любого $x \in l^p(w)$ $(P_n x)_i = \begin{cases} x_i, & i \leq n \\ 0, & i > n \end{cases}$, $R_n + P_n = I$, где I – тождественное отображение из $l^p(w)$ в $l^p(w)$. Тогда справедливы следующие утверждения для любого $n \in \mathbb{N}$:

- (i) $P_n, R_n \in \mathcal{L}(l^p(w))$;
- (ii) $P_n, R_n \in \mathcal{L}_\omega(l^p(w))$;
- (iii) $P_n \in \mathcal{K}_\omega(l^p(w))$;
- (iv) $\|R_n\| = 1$.

Доказательство (i): для любого $x \in l^p(w)$ справедливо:

$$\|P_n(x)\|_{p,w}^p = \sum_{k=1}^n |x_k|^p w^p(k) \leq \sum_{k=1}^\infty |x_k|^p w^p(k) = \|x\|_{p,w}^p,$$

$$\|R_n(x)\|_{p,w}^p = \sum_{k=n+1}^\infty |x_k|^p w^p(k) \leq \sum_{k=1}^\infty |x_k|^p w^p(k) = \|x\|_{p,w}^p;$$

(ii): $l^p(w)$ непрерывно вложено в ω для любого $p \in (0, \infty)$. Остаётся заметить, что P_n и R_n действуют непрерывно из ω в ω ;

(iii): $Im(P_n)$ изоморфен \mathbb{C}^n , т.е. P_n – конечномерный, значит, $P_n \in \mathcal{K}(l^p(w))$. Учитывая утверждение (ii), получим $P_n \in \mathcal{K}_\omega(l^p(w))$;

(iv): для любого $x \in l^p(w)$, для которого $\|x\|_{p,w} = 1$, выполняется

$\|R_n x\|_{p,w}^p = \sum_{k=n+1}^{\infty} |x_k|^p w^p(k) \leq 1$, поэтому $\|R_n\| \leq 1$, но $\left\|R_n \left(\frac{e_{n+1}}{w(n+1)}\right)\right\|_{p,w} = 1$, откуда $\|R_n\| = 1$. Здесь $(e_n) = (\delta_{nk})_{k=1}^{\infty}$, где δ_{nk} – символ Кронекера.

Следующий результат, по-видимому, известен. Однако в литературе его найти не удалось. В связи с этим его доказательство приводится для полноты изложения.

Предложение 3. Ограниченное множество $A \subset l^p(w), p \in (0,1]$, предкомпактно, если и только если для любого $\varepsilon > 0$ найдётся такой натуральный N , что для всех x из A справедливо $\sum_{k=N+1}^{\infty} |x_k|^p w^p(k) < \varepsilon$.

Доказательство. Необходимость. Для любого $\varepsilon > 0$ найдётся такое конечное множество $\{x^1, \dots, x^m\} \subset l^p(w)$, что $A \subset \bigcup_{i=1}^m B\left(x^i, \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^{\frac{1}{p}}\right)$, причём для любого $x^i \in \{x^1, \dots, x^m\}$ справедливо $\sum_{k=N_i+1}^{\infty} |x_k^i|^p w^p(k) < \frac{\varepsilon}{2}$.

Здесь $N_i = N_i(x^i)$. Пусть $N = \max\{N_1, \dots, N_m\}$. Тогда для любого $i \in \{1, \dots, m\}$ верно $\sum_{k=N+1}^{\infty} |x_k^i|^p w^p(k) < \frac{\varepsilon}{2}$.

Итак, для любого $x \in A$ получим

$$\begin{aligned} \sum_{k=N+1}^{\infty} |x_k|^p w^p(k) &\leq \sum_{k=N+1}^{\infty} |x_k - x_k^i|^p w^p(k) + \sum_{k=N+1}^{\infty} |x_k^i|^p w^p(k) \leq \\ &\leq \|x - x^i\|_{p,w}^p + \sum_{k=N+1}^{\infty} |x_k^i|^p w^p(k) < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

Достаточность. Рассмотрим оператор $P_N(x) = (x_1, \dots, x_N, 0, 0, \dots)$. Для любого $x \in A$ $\|x - P_N(x)\|_{p,w}^p = \sum_{k=N+1}^{\infty} |x_k|^p w^p(k) < \frac{\varepsilon}{2}$, где ε – произвольное положительное число. Но множество $P_N(A)$ ограничено, причём $\dim P_N(A) < \infty$, поэтому $P_N(A)$ является предкомпактным и, следовательно, найдутся такие $y^1, \dots, y^M \in \mathbb{C}^N$, что $P_N(A) \subset \bigcup_{i=1}^M B\left(y^i, \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^{\frac{1}{p}}\right)$.

Для любого $y^i, i \in \{1, \dots, M\}$, рассмотрим такой $x^i \in l^p(w)$, что $P_N(x^i) = y^i$. Тогда для любого $x \in A$ найдётся такой номер $i \in \{1, \dots, M\}$, что $\|P_N(x) - y^i\|_{p,w}^p < \frac{\varepsilon}{2}$.

$$\text{Нетрудно видеть, что } \|x - x^i\|_{p,w}^p \leq \|x - P_N(x)\|_{p,w}^p + \|P_N(x) - y^i\|_{p,w}^p < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon.$$

Замечание 1. Отметим, что справедливость данного предложения в случае $p > 1$ следует из критерия Хаусдорфа предкомпактности множества и неравенства Минковского.

Доказательство следующего утверждения стандартно и мы его опускаем.

Предложение 4. Для любых $L, T \in \mathcal{L}(l^p(w)), p \in (0,1)$, справедливы соотношения:

- 1) $\|L + T\|^p \leq \|L\|^p + \|T\|^p$;
- 2) $\|L - T\|^p \geq \|L\|^p - \|T\|^p$.

Далее приведём доказательство утверждения, представляющего самостоятельный интерес. Заметим, что аналогичное утверждение справедливо и для ω -существенных норм ω -непрерывных операторов.

Предложение 5. Для любого $L \in \mathcal{L}(l^p(w))$ верно, что $\|R_n L\|_e = \|LR_n\|_e$ при $n \in \mathbb{N}$.

Доказательство.

$$\begin{aligned} \|L\|_e &= \|L\|_e = \|L(R_n + P_n)\|_e = \|LR_n + LP_n\|_e = \|LR_n\|_e; \\ \|L\|_e &= \|L\|_e = \|(R_n + P_n)L\|_e = \|R_n L + P_n L\|_e = \|R_n L\|_e. \end{aligned}$$

Здесь в доказательстве используется аналог предложения 1 для существенной нормы и компактность операторов LP_n и $P_n L$.

Докажем теорему о формуле существенной нормы линейного непрерывного оператора в предельной форме.

Теорема 1. Для любого линейного оператора $L \in \mathcal{L}(l^p(w))$ при $p \in (0,1]$ верна формула

$$\|L\|_e = \lim \|R_n L\|_e. \tag{2}$$

Доказательство. Для произвольного компактного оператора K на $l^p(w)$, учитывая предложение 4, имеем

$$\|L - K\|^p = (\|R_n\| \|L - K\|)^p \geq \|R_n L - R_n K\|^p \geq \|R_n L\|^p - \|R_n K\|^p. \quad (3)$$

Множество $K(B)$ предкомпактно. Тогда по предложению 3 для произвольного $\varepsilon > 0$ найдём такой номер N , что неравенство $\sum_{k=N+1}^{\infty} |y_k|^p w^p(k) < \varepsilon$ верно для всех $y \in K(B)$. Поэтому $\sup_{y \in K(B)} \|R_n y\|^p < \varepsilon$ для любого $n \geq N$. Следовательно, $\|R_n K\| < \varepsilon$, откуда $\|R_n K\| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$. Принимая во внимание (3), имеем $\|L - K\| \geq \limsup \|R_n L\|$.

Переходя к инфимуму по K , получим

$$\|L\|_e \geq \limsup \|R_n L\|. \quad (4)$$

Далее заметим, что

$$\|L\|_e = \|IL\|_e = \|(R_n + P_n)L\|_e = \|R_n L + P_n L\|_e = \|R_n L\|_e \leq \|R_n L\| \text{ для всех } n \in \mathbb{N}.$$

Поэтому

$$\|L\|_e \leq \liminf \|R_n L\|. \quad (5)$$

Учитывая (4) и (5), получаем нужное.

Замечание 2.

1. Нетрудно видеть, что данное утверждение справедливо и в случае $p > 1$.

2. Проводя аналогичные рассуждения при вычислении ω -существенной нормы для $L \in \mathcal{L}_\omega(l^p(w)), p \in (0, \infty)$, получим формулу

$$\|L\|_{\omega e} = \lim \|R_n L\|. \quad (6)$$

В случае, когда $L \in \mathcal{L}(l^p(w)) \setminus \mathcal{L}_\omega(l^p(w))$, формула (6) перестает быть верной, так как $P_n L$, вообще говоря, не является ω -компактным для произвольного n . Если же $L \in \mathcal{L}_\omega(l^p(w))$, то формулы (2) и (6) имеют место. И поэтому справедлива

Теорема 2. Для любого линейного оператора $L \in \mathcal{L}_\omega(l^p(w)), p \in (0, \infty)$, верно равенство $\|L\|_e = \|L\|_{\omega e}$.

Естественным образом возникает вопрос, ответа на который мы не знаем: верно ли, что если $\|L\|_e = \|L\|_{\omega e}$, то $L \in \mathcal{L}_\omega(l^p(w))$?

Рассмотрим применение этого результата на конкретном примере. Как было сказано выше, для оператора весовой композиции $C_{\varphi,u} \in \mathcal{L}_\omega(l^p(w))$ в [6] для $p > 1$ доказано, что

$$\|C_{\varphi,u}\|_e = \|C_{\varphi,u}\|_{\omega e}. \text{ Кроме того, были найдены точные формулы: } \|C_{\varphi,u}\|_e = \|C_{\varphi,u}\|_{\omega e} = r_{\varphi,u} \text{ при } p > 1, \|C_{\varphi,u}\|_{\omega e} = r_{\varphi,u} \text{ при } p \in (0,1].$$

Напомним, что $r_{\varphi,u} = \inf\{r > 0: \mathbb{I}_{\varphi,u}(r) \text{ конечно}\}$, где $\mathbb{I}_{\varphi,u}(r) = \{n \in \mathbb{N}: (\xi_{p,w}^{\varphi,u})^{\frac{1}{p}} \geq r > 0\}$, а

$$\xi_{p,w}^{\varphi,u} \text{ задается соотношением } \xi_{p,w}^{\varphi,u}(n) = \begin{cases} \frac{1}{w^p(n)} \sum_{k \in \varphi^{-1}(n)} |u(k)|^p w^p(k), & \varphi^{-1}(n) \neq \emptyset \\ 0, & \varphi^{-1}(n) = \emptyset \end{cases}.$$

Принимая во внимание теорему 2, сформулируем усиление результата, полученного в [6].

Теорема 3. Для любого $p \in (0; \infty)$ $\|C_{\varphi,u}\|_e = \|C_{\varphi,u}\|_{\omega e} = r_{\varphi,u}$.

Список источников

1. Thomas M.P. Closed ideals of $l^1(\omega_n)$ when $\{\omega_n\}$ is star shaped // Pacific J. Math. 1983. Vol. 105, № 1. P. 237–255. <https://doi.org/10.2140/pjm.1983.105.237>
2. Якубович Д.В. Инвариантные подпространства операторов взвешенного сдвига // Зап. науч. сем. ЛОМИ. 1985. Т. 141. С. 100–143.
3. Albanese A.A., Bonet J., Ricker W.J. Spectrum and compactness of the Cesaro operator on weighted l_p spaces // J. Aust. Math. Soc. 2015. Vol. 99, № 3. P. 287–314. <https://doi.org/10.1017/S1446788715000221>
4. Albanese A.A., Bonet J., Ricker W.J. The Cesaro operator in weighted l_1 spaces // Math. Nachr. 2018. Vol. 291, № 7. P. 1015–1048. <https://doi.org/10.1002/mana.201600509>
5. Luan D.M., Khoi L.H. Weighted composition operators on weighted sequence spaces // Contemp. Math. 2015. Vol. 645, № 7. P. 199–215.

6. Абанин А.В., Маннаников Р.С. Операторы весовой композиции на квазибанаховых весовых пространствах последовательностей // Владикавказский мат. журн. 2023. Т. 25, вып. 4. С. 5–19. EDN: PXVMBQ. <https://doi.org/10.46698/x5057-2500-3053-t>

References

1. Thomas M.P. Closed ideals of $l^1(\omega_n)$ when $\{\omega_n\}$ is star shaped. *Pacific J. Math.* 1983;105(1):237-255. <https://doi.org/10.2140/pjm.1983.105.237>
2. Yakubovich D.V. Invariant subspaces of weighted shift operators. *Notes from scientific seminars at the Leningrad branch of the Steklov Mathematical Institute of the USSR Academy of Science.* 1985;141:100-143. (In Russ.).
3. Albanese A.A., Bonet J., Ricker W.J. Spectrum and compactness of the Cesaro operator on weighted l_p spaces. *J. Aust. Math. Soc.* 2015;99(3):287-314. <https://doi.org/10.1017/S1446788715000221>
4. Albanese A.A., Bonet J., Ricker W.J. The Cesaro operator in weighted l_1 spaces. *Math. Nachr.* 2018;291(7):1015-1048. <https://doi.org/10.1002/mana.201600509>
5. Luan D.M., Khoi L.H. Weighted composition operators on weighted sequence spaces. *Contemp. Math.* 2015;645(7):199-215.
6. Abanin A.V., Mannanikov R.S. Weight composition operators on Quasibanach weight spaces of sequences. *Vladikavkaz Mathematical J.* 2023;25(4):5-19. (In Russ.). EDN: PXVMBQ. <https://doi.org/10.46698/x5057-2500-3053-t>

Информация об авторе

Р.С. Маннаников – аспирант, ассистент кафедры математического анализа и геометрии Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ.

Information about the authors

R.S. Mannanikov – Postgraduate Student, Assistant of the Department of Mathematical Analysis and Geometry, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, SFedU.

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена после рецензирования 23.07.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 30.06.2025; approved after reviewing 23.07.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 519.64

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-20-24>

КВАДРАТУРНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ СИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ НА ОТРЕЗКЕ ИНТЕГРИРОВАНИЯ С ФИКСИРОВАННЫМИ УЗЛАМИ

Шалва Соломонович Хубежты¹, Любовь Юрьевна Плиева²

^{1, 2} Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, Владикавказ, Россия

¹ Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ, Россия

¹ Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве РФ, Владикавказ, Россия

¹shalva57@rambler.ru,

²plieva-21@mail.ru

Аннотация. Строятся квадратурные формулы для сингулярных интегралов на отрезке интегрирования $[-1, 1]$ с весовыми функциями $p(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}}$, $p(t) = \sqrt{1-t^2}$. При построении используется интерполяционный многочлен Лагранжа со значениями функций в фиксированных точках $\{-1; 1\}$ и в нулях многочленов Чебышева, ортогональных на $[-1, 1]$ по соответствующим весовым функциям. При вычислении коэффициентов применяются формулы для сингулярных интегралов, где плотности – многочлены Чебышева первого и второго рода. Найденные формулы являются квадратурными интерполяционного типа. Приводятся примеры, подтверждающие их эффективность для вычисления сингулярных интегралов. В качестве плотности берутся функции $\varphi(t) = 1$, $\varphi(t) = t$ и $\varphi(t) = t^2$, для которых получаются точные результаты. Для квадратурных формул даются оценки погрешности. Такие квадратурные формулы имеют алгебраическую степень точности $n + 1$.

Ключевые слова: сингулярные интегралы, квадратурная формула, узлы, весовая функция, интерполяционный многочлен, остаточный член

Для цитирования: Хубежты Ш.С., Плиева Л.Ю. Квадратурные формулы для сингулярных интегралов на отрезке интегрирования с фиксированными узлами // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 20–24. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-20-24>

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

Original article

QUADRATURE FORMULAS FOR SINGULAR INTEGRALS ON A FIXED-NODE INTEGRATION SEGMENT

Shalva S. Khubezhty¹, Lyubov Yu. Plieva²

^{1, 2} Khetagurov North Ossetian State University, Vladikavkaz, Russia

¹ Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

¹ Vladikavkaz branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation, Vladikavkaz, Russia

¹shalva57@rambler.ru

²plieva-21@mail.ru

© Хубежты Ш.С., Плиева Л.Ю., 2025

Abstract. Quadrature formulas are constructed for singular integrals on the integration segment $[-1, 1]$, with weight functions $w(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}}$, $p(t) = \sqrt{1-t^2}$. The construction uses the Lagrange interpolation polynomial with function values at fixed points $\{-1; 1\}$ and at zeros of Chebyshev polynomials orthogonal to $[-1, 1]$ with respect to the corresponding weight functions. When calculating the coefficients of the quadrature formula, formulas for singular integrals are used, where Chebyshev polynomials of the first and second genera are taken as the density. The formulas obtained are quadrature formulas of the interpolation type. The paper provides examples confirming the effectiveness of the obtained quadrature formulas for calculating singular integrals. In frequency, the functions $\varphi(t) = 1$, $\varphi(t) = t$ and $\varphi(t) = t^2$ are used as density, for which accurate results are obtained. Estimates of the error are given for the obtained quadrature formulas. The resulting quadrature formulas have an algebraic degree of accuracy of $n + 1$.

Keywords: singular integrals, quadrature formula, nodes, weight function, interpolation polynomial, residual term

For citation: Khubezhty Sh.S., Plieva L.Yu. Quadrature Formulas for Singular Integrals on a Fixed-Node Integration Segment. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):20-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-20-24>

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

Введение

Рассматриваются сингулярные интегралы вида $J = \int_{-1}^1 p(t) \frac{\varphi(t)}{t-x} dt$, $p(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}}$, $\sqrt{1-t^2}$, $-1 < x < 1$.

Для их вычисления строятся квадратурные формулы, содержащие фиксированные узлы $\{-1; 1\}$. Применяются ортогональные многочлены Чебышева первого и второго рода [1, 2].

$$J = \int_{-1}^1 p(t) \frac{\varphi(t)}{t-x} dt \approx A(x)\varphi(-1) + B(x)\varphi(1) + \sum_{k=1}^n A_k(x)\varphi(x_k), \quad (1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – корни многочленов Чебышева, соответствующие весовым функциям $p(t)$.

Актуальность формул типа (1) заключается в том, что в граничных задачах математической физики, в дифференциальных и интегральных уравнениях на концах отрезка $[-1, 1]$ часто бывают известны значения неизвестной функции. В этих случаях желательно использовать квадратурные формулы типа (1), способствующие повышению точности вычислений.

Квадратурные формулы для сингулярного интеграла $J(x)$

Рассмотрим интеграл

$$J_1(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\varphi(t)}{t-x} dt, \quad -1 < x < 1. \quad (2)$$

На отрезке $[-1, 1]$ при весовой функции $p(t) = \frac{1}{\sqrt{1-t^2}}$ ортогональными являются многочлены Чебышева первого рода $T_n(t) = \cos(n \arccos t)$ ($n = 0, 1, \dots$), корни которых $x_k = \cos \frac{2k-1}{2n} \pi$ ($k = 1, 2, \dots, n$).

В роли фундаментальных будем рассматривать многочлены степени $n + 2$ вида $\Omega(t) = (t^2 - 1)T_n(t)$. Тогда интерполяционный многочлен Лагранжа с узлами $-1, 1, x_1, x_2, \dots, x_n$ будет иметь вид

$$L_{n+2}(\varphi, t) = \frac{\Omega(t)}{(t+1)\Omega'(-1)} \varphi(-1) + \frac{\Omega(t)}{(t-1)\Omega'(1)} \varphi(1) + \sum_{k=1}^n \frac{\Omega(t)}{(t-x_k)\Omega'(x_k)} \varphi(x_k), \quad (3)$$

где $\Omega'(-1) = -2T_n(-1) = 2(-1)^{n-1}$, $\Omega'(1) = 2T_n(1) = 2$, $\Omega'(x_k) = (x_k^2 - 1)T'_n(x_k)$.

Подставляя многочлен (3) вместо $\varphi(t)$ в интеграл (2), получим

$$J_1 = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\varphi(t)}{t-x} dt \approx \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \cdot \frac{1}{t-x} \left[\frac{(t-1)T_n(t)}{2(-1)^{n-1}} \varphi(-1) + \frac{(t+1)T_n(t)}{2} \varphi(1) + \sum_{k=1}^n \frac{(t^2-1)T_n(t)}{(t-x_k)(x_k^2-1)T'_n(x_k)} \varphi(x_k) \right] dt = A(x)\varphi(-1) + B(x)\varphi(1) + \sum_{k=1}^n A_k(x)\varphi(x_k).$$

Коэффициенты $A(x)$, $B(x)$, $A_k(x)$ имеют вид

$$A(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{1}{t-x} \frac{(t-1)T_n(t)}{2(-1)^{n-1}} dt,$$

$$B(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{1}{t-x} \frac{(t+1)T_n(t)}{2} dt,$$

$$A_k(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{1}{t-x} \frac{(t^2-1)T_n(t)}{(t-x_k)(x_k^2-1)T'_n(x_k)} dt \quad (k = 1, 2, \dots, n).$$

Для их вычисления будем пользоваться формулами из [3–5]

$$\frac{1}{(t-x_k)(t-x)} = \frac{1}{x-x_k} \left(\frac{1}{t-x} - \frac{1}{t-x_k} \right), \quad T'_n(x_k) = nU_{n-1}(x_k),$$

$$\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{T_n(t)}{t-x} dt = \pi U_{n-1}(x), \quad U_{n-1}(x) = \frac{\sin(\arccos x)}{\sqrt{1-x^2}},$$

$$\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} T_n(t) Q(t) dt = 0,$$

$$\int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{U_n(t)}{t-x} dt = -\pi T_{n+1}(x), \quad \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} U_n(t) Q(t) dt = 0,$$

где $Q(t)$ – произвольный многочлен степени $\leq n-1$.

$$A(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\Omega(t)}{(t-x)(t+1)\Omega'(-1)} dt = \frac{1}{\Omega'(-1)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{(t-1)T_n(t)}{t-x} dt = \frac{1}{\Omega'(-1)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \left(\frac{(t-1)T_n(t)}{t-x} - \frac{(x-1)T_n(t)-(x-1)T_n(t)}{t-x} \right) dt =$$

$$= \frac{1}{\Omega'(-1)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} T_n(t) dt + \frac{1}{\Omega'(-1)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{(x-1)T_n(t)}{t-x} dt = \frac{(x-1)\pi U_{n-1}(x)}{2(-1)^{n-1}}.$$

$$B(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\Omega(t)}{(t-x)(t-1)\Omega'(1)} dt = \frac{1}{\Omega'(1)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{(t+1)T_n(t)}{t-x} dt = \frac{1}{\Omega'(1)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \left(\frac{(t+1)T_n(t)}{t-x} - \frac{(x+1)T_n(t)-(x+1)T_n(t)}{t-x} \right) dt =$$

$$= \frac{1}{\Omega'(1)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} T_n(t) dt + \frac{1}{\Omega'(1)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{(x+1)T_n(t)}{t-x} dt = \frac{(x+1)\pi U_{n-1}(x)}{2}.$$

$$A_k(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\Omega(t)}{(t-x)(t-x_k)\Omega'(x_k)} dt = \frac{1}{\Omega'(x_k)(x-x_k)} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \left[\frac{(t^2-1)T_n(t)}{t-x} - \frac{(t^2-1)T_n(t)}{t-x_k} \right] dt =$$

$$= \frac{1}{\Omega'(x_k)(x-x_k)} \left[\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} (t+x)T_n(t) dt + (x^2-1) \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{T_n(t)}{t-x} dt - \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} (t+x_k)T_n(t) dt - (x_k^2-1) \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{T_n(t)}{t-x_k} dt \right] =$$

$$= \frac{\pi}{\Omega'(x_k)(x-x_k)} \left[(x^2-1)U_{n-1}(x) - (x_k^2-1)U_{n-1}(x_k) \right] =$$

$$= \frac{\pi}{nU_{n-1}(x_k)(x_k^2-1)(x-x_k)} \left[(x^2-1)U_{n-1}(x) - (x_k^2-1)U_{n-1}(x_k) \right].$$

С учетом значений коэффициентов получим следующую квадратурную формулу:

$$\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\varphi(t)}{t-x} dt \approx \frac{(x-1)\pi U_{n-1}(x)}{2(-1)^{n-1}} \varphi(-1) + \frac{(x+1)\pi U_{n-1}(x)}{2} \varphi(1) +$$

$$+ \frac{\pi}{n} \sum_{k=1}^n \frac{(x^2-1)U_{n-1}(x) - (x_k^2-1)U_{n-1}(x_k)}{U_{n-1}(x_k)(x_k^2-1)(x-x_k)} \varphi(x_k), \quad n = 2, 3, \dots$$

Построим квадратурную формулу для $n = 1$.

Справедливы равенства:

$$\Omega(t) = (t^2 - 1)t, \quad \Omega'(t) = 3t^2 - 1,$$

$$\Omega'(-1) = 2, \quad \Omega'(1) = 2, \quad \Omega'(0) = -1.$$

Коэффициенты квадратурной формулы с учетом этих равенств имеют вид

$$A(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\Omega(t)}{(t-x)(t+1)\Omega'(-1)} dt = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{(t-1)t}{t-x} dt = \frac{\pi}{2}(x-1),$$

$$B(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\Omega(t)}{(t-x)(t-1)\Omega'(1)} dt = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{(t+1)t}{t-x} dt = \frac{\pi}{2}(x+1),$$

$$A_1(x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\Omega(t)}{t(t-x)\Omega'(0)} dt = - \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{t^2-1}{t-x} dt = -\pi x.$$

Таким образом, для $n = 1$ получим следующую квадратурную формулу:

$$J_1 = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\varphi(t)}{t-x} dt \approx \frac{\pi}{2}(x-1)\varphi(-1) + \frac{\pi}{2}(x+1)\varphi(1) - \pi x\varphi(x_1). \quad (5)$$

Её эффективность проверим для функций $\varphi(t) = 1$, $\varphi(t) = t$ и $\varphi(t) = t^2$.

Найдём точные (J_{1T}) и приближенные (J_{1np}) значения интеграла J_1 .

$$\varphi(t) = 1. \quad J_{1\Gamma} = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2} t-x} dt = 0, \quad J_{1\Pi} = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2} t-x} dt \approx \frac{\pi}{2}(x-1) + \frac{\pi}{2}(x+1) - \pi x = 0.$$

$$\varphi(t) = t. \quad J_{1\Gamma} = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2} t-x} dt = \pi,$$

$$J_{1\Pi} = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2} t-x} dt \approx \frac{\pi}{2}(x-1) \cdot (-1) + \frac{\pi}{2}(x+1) \cdot 1 - \pi x \cdot 0 = \pi.$$

$$\varphi(t) = t^2. \quad J_{1\Gamma} = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2} t-x} dt = \pi x,$$

$$J_{1\Pi} = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2} t-x} dt \approx \frac{\pi}{2}(x-1) + \frac{\pi}{2}(x+1) - \pi x \cdot 0 = \pi x.$$

Указанные примеры показывают точность квадратурной формулы (5).

Остаточный член построенной квадратурной формулы имеет вид

$$R_n(\varphi, x) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\varphi^{(n+2)}(\xi)}{(n+2)!2^{n-1}} \frac{(t^2-1)T_n(t)}{t-x} dt, \quad -1 < \xi < 1.$$

Рассмотрим интеграл

$$J_2 = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{\varphi(t)}{t-x} dt, \quad -1 < x < 1. \quad (6)$$

На отрезке $[-1, 1]$ при $p(t) = \sqrt{1-t^2}$ ортогональными являются многочлены Чебышева второго рода $U_{n-1}(t) = \frac{\sin(n \arccos t)}{\sqrt{1-t^2}}$, корни которых $x_k = \cos \frac{k\pi}{n+1}$ ($k = 1, 2, \dots, n$).

Интерполяционный многочлен Лагранжа с узлами $-1, 1, x_1, x_2, \dots, x_n$ имеет вид

$$L_{n+2}(\varphi, t) = \frac{\Omega(t)}{(t+1)\Omega'(-1)} \varphi(-1) + \frac{\Omega(t)}{(t-1)\Omega'(1)} \varphi(1) + \sum_{k=1}^n \frac{\Omega(t)}{(t-x_k)\Omega'(x_k)} \varphi(x_k), \quad (7)$$

где $\Omega(t) = (t^2 - 1)U_n(t)$, $\Omega'(-1) = -2U_n(-1) = 2(n+1)(-1)^n$, $\Omega'(1) = 2U_n(1) = 2(n+1)$, $\Omega'(x_k) = (x_k^2 - 1)U'_n(x_k) = (n+1)(-1)^k$.

Подставляя (7) вместо $\varphi(t)$ в (6), получим квадратурную формулу типа (1), коэффициенты которой вычисляются по формулам:

$$A(x) = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{1}{t-x} \frac{(t-1)U_n(t)}{\Omega'(-1)} dt, \quad B(x) = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{1}{t-x} \frac{(t+1)U_n(t)}{\Omega'(1)} dt,$$

$$A_k(x) = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{1}{t-x} \frac{(t^2-1)U_n(t)}{(t-x_k)\Omega'(x_k)} dt \quad (k = 1, 2, \dots, n).$$

Как и выше, используя (4), получим

$$A(x) = \frac{(x-1)\pi T_{n+1}(x)}{2(n+1)(-1)^n}, \quad B(x) = -\frac{(x+1)\pi T_{n+1}(x)}{2(n+1)},$$

$$A_k(x) = \frac{\pi}{(n+1)(-1)^k(x-x_k)} \left[-(x^2-1)T_{n+1}(x) + (x_k^2-1)T_{n+1}(x_k) \right],$$

$$J_2 = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{\varphi(t)}{t-x} dt \approx \frac{(x-1)\pi T_{n+1}(x)}{2(n+1)(-1)^n} \varphi(-1) - \frac{(x+1)\pi T_{n+1}(x)}{2(n+1)} \varphi(1) + \frac{\pi}{n+1} \sum_{k=1}^n \frac{(x^2-1)T_{n+1}(x) - (x_k^2-1)T_{n+1}(x_k)}{(-1)^{k-1}(x-x_k)} \varphi(x_k), \quad n = 2, 3, \dots \quad (8)$$

Остаточный член формулы (8) имеет вид

$$R_n(\varphi, x) = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{\varphi^{(n+2)}(\xi)}{(n+2)!2^n} \frac{(t^2-1)U_n(t)}{t-x} dt, \quad -1 < \xi < 1.$$

Для $n = 1$ получим следующую квадратурную формулу:

$$\int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{\varphi(t)}{t-x} dt \approx \frac{\pi}{4}(x-1-2x^3+2x^2)\varphi(-1) + \frac{\pi}{4}(x+1-2x^3+2x^2)\varphi(1) + \frac{\pi}{2}(2x^2-3x)\varphi(x_1). \quad (9)$$

Для функций $\varphi(t) = t$ и $\varphi(t) = t^2$ вычислены точные и приближенные значения сингулярного интеграла:

$$J_{2\Gamma} = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{t}{t-x} dt = \frac{\pi}{2}(1-2x^2), \quad J_{2\Pi} = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{t^2}{t-x} dt = \frac{\pi}{2}(-2x^3+x),$$

$$J_{2\Pi} = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{t}{t-x} dt \approx \frac{\pi}{4}(x-1-2x^3+2x^2)(-1) + \frac{\pi}{4}(x+1-2x^3-2x^2) + \frac{\pi}{2}(2x^3-3x) \cdot 0 = \frac{\pi}{2}(1-2x^2),$$

$$J_{2np} = \int_{-1}^1 \sqrt{1-t^2} \frac{t^2}{t-x} dt \approx \frac{\pi}{4}(x-1-2x^3+2x^2) + \frac{\pi}{4}(x+1-2x^3-2x^2) + \frac{\pi}{2}(2x^3-3x) \cdot 0 = \frac{\pi}{2}(x-2x^3).$$

Таким образом, квадратурная формула (9) справедлива для функций $\varphi(t) = t$ и $\varphi(t) = t^2$.

Список источников

1. Хубежты Ш.С. Квадратурные формулы для сингулярных интегралов и некоторые их применения. Владикавказ: ЮМИ ВНИЦ РАН, 2011. 236 с. EDN: QJZQDZ.
2. Хубежты Ш.С., Плиева Л.Ю. Квадратурные формулы для сингулярных интегралов, содержащие значения функции и ее производных // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2024. Т. 64, № 12. С. 2303–2311. EDN: KCAUSX. <https://doi.org/10.31857/S0044466924120064>
3. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. М.: Наука, 1967. 500 с.
4. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях. М.: Наука, 1985. 253 с.
5. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. М.: Янус, 1995. 520 с. EDN: UKXDAN.

References

1. Khubezhty Sh.S. *Quadrature formulas for singular integrals and some of their applications*. Vladikavkaz: Southern Mathematical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2011. 236 p. (In Russ.). EDN: QJZQDZ.
2. Khubezhty Sh.S., Plieva L.Yu. Quadrature formulas for singular integrals containing the values of a function and its derivatives. *J. of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2024;64(12):2303-2311. (In Russ.). EDN: KCAUSX. <https://doi.org/10.31857/S0044466924120064>
3. Krylov V.I. *Approximate calculation of integrals*. Moscow: Science; 1967. 500 p. (In Russ.).
4. Belotserkovsky S.M., Lifanov I.K. *Numerical methods in singular integral equations*. Moscow: Science; 1985. 253 p. (In Russ.).
5. Lifanov I.K. *Method of singular integral equations and numerical experiment*. Moscow: Janus, 1995. 520 p. (In Russ.). EDN: UKXDAN.

Информация об авторах

Ш.С. Хубежты – доктор физико-математических наук, профессор кафедры алгебры и анализа СОГУ; ведущий научный сотрудник ЮМИ – филиала ВНИЦ РАН; профессор кафедры математики и информатики ВФ ФинУ.

Л.Ю. Плиева – старший преподаватель кафедры алгебры и анализа СОГУ.

Information about the authors

Sh.S. Khubezhty – Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Department of Algebra and Analysis, NOSU; Leading Researcher, SMI - Branch of the VSC RAS; Professor of the Department of Mathematics and Computer Science, VB FU.

L.Yu. Plieva – Senior Lecturer of the Department of Algebra and Analysis, NOSU.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025; одобрена после рецензирования 30.07.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 26.06.2025; approved after reviewing 30.07.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 539.3

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-25-33>

ПЛОСКАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГОГО ШТАМПА С КУСОЧНО-ОДНОРОДНОЙ УПРУГОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ, ЛЕЖАЩЕЙ НА ВИНКЛЕРОВСКОМ ОСНОВАНИИ

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

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

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

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

Аннотация. Рассматривается плоская изотропная контактная задача о взаимодействии упругого тела с кусочно-однородной упругой конструкцией, лежащей на винклеровском основании. Кусочно-однородная конструкция является комбинацией упругого прямоугольника, нижняя граница которого опирается без трения на некоторое количество одинаковых упругих прямоугольников меньшего размера, лежащих на винклеровском основании. При этом прямоугольники находятся друг от друга на одинаковом расстоянии. Предполагается, что основание штампа имеет форму окружности, в зонах контакта отсутствует трение. Для решения поставленной контактной задачи используется метод конечных элементов. Проведено исследование контактных напряжений в областях взаимодействия упругих тел конструкции и относительной деформации всей конструкции. Выполнен сравнительный анализ исследуемых величин для различных значений параметров кусочно-однородной конструкции, при варьировании коэффициента постели и величины нагрузки. Численные результаты представлены в виде таблиц. Результаты исследований могут быть использованы при расчете взаимодействия колес и железнодорожных рельсов, опирающихся на шпалы, лежащие на грунтовых основаниях различного типа.

Ключевые слова: контактная задача, упругие тела, плоская задача, винклеровское основание, метод конечных элементов, ANSYS

Для цитирования: Чебаков М.И., Колосова Е.М. Плоская контактная задача о взаимодействии упругого штампа с кусочно-однородной упругой конструкцией, лежащей на винклеровском основании // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 25–33. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-25-33>

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

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

Original article

PLANE CONTACT PROBLEM OF INTERACTION OF AN ELASTIC STAMP WITH A PIECEWISE-HOMOGENEOUS ELASTIC STRUCTURE LAYING ON A WINKLER FOUNDATION

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

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

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

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

© Чебаков М.И., Колосова Е.М., 2025

Abstract. The paper considers a plane isotropic contact problem of interaction between an elastic body and a piecewise homogeneous elastic structure lying on a Winkler foundation. The piecewise homogeneous structure is a combination of an elastic rectangle whose lower boundary rests without friction on a number of identical elastic rectangles of a smaller size lying on the Winkler foundation. The rectangles are located at the same distance from each other. It is assumed that the stamp base has the shape of a circle, and there is no friction in the contact zones. The finite element method is used to solve contact problems. The contact stresses in the interaction areas of the elastic bodies of the structure and the relative deformation of the entire structure are studied. A comparative analysis of the studied quantities is carried out for different values of the parameters of the piecewise homogeneous structure, with varying of the coefficient of subgrade resistance and load value. The numerical results are presented in the form of tables. The results of the research can be used in calculating of the interaction of wheels and railway rails supported by sleepers lying on soil foundations of various types.

Keywords: contact problem, elastic bodies, plane problem, Winkler foundation, finite element method, ANSYS

For citation: Chebakov M.I., Kolosova E.M. Plane Contact Problem of Interaction of an Elastic Stamp with a Piecewise-Homogeneous Elastic Structure Laying on a Winkler Foundation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):25-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-25-33>

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

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

Введение

Исследование проблем механики контактных взаимодействий представляет собой важную задачу для науки и техники. Этой тематике посвящено большое количество работ, обзор которых можно найти в монографиях [1–4]. В них в основном рассматривались задачи о взаимодействии жестких штампов с телами классической формы: полосой, слоем, клином, цилиндрическим слоем, сферическим слоем. Большой интерес представляют контактные задачи о взаимодействии сложных упругих конструкций с различными грунтовыми основаниями. Пример таких конструкций – железнодорожное полотно, взаимодействующее со шпалами на грунтовом основании. Одна из известных механических моделей грунтового основания – модель Винклера. Её основное свойство – прямо пропорциональная зависимость между реакцией основания и вертикальным перемещением его поверхности. В работах [3, 5, 6] описаны, соответственно, контактные задачи для упругой и пороупругой полосы, лежащей на винклеровском основании.

Постановка задачи

Рассмотрим в декартовой системе координат (x, y) плоскую изотропную контактную задачу о взаимодействии упругого штампа с упругим прямоугольником $0 \leq y \leq h_1$, $-b \leq x \leq b$, нижняя граница которого опирается без трения на упругие прямоугольники высотой h_2 , шириной d_1 , при этом расстояние между прямоугольниками равно d_2 . В свою очередь, прямоугольники опираются на винклеровское основание. Возьмем два варианта симметричного взаимодействия штампа и кусочно-однородной конструкции. В первом случае первоначальная точка касания штампа и конструкции находится напротив середины расстояния между прямоугольниками, во втором – напротив середины прямоугольника (рис. 1). В силу симметрии в первом случае – чётное количество прямоугольников, во втором – нечётное. Предполагаем, что упругий штамп имеет форму полукруга радиусом R .

Для удобства обозначим упругий штамп символом A , упругий прямоугольник $0 \leq y \leq h_1$, $-b \leq x \leq b$ – символом B , а малые упругие прямоугольники $-h_2 \leq y \leq 0$ шириной d_1 – символом C .

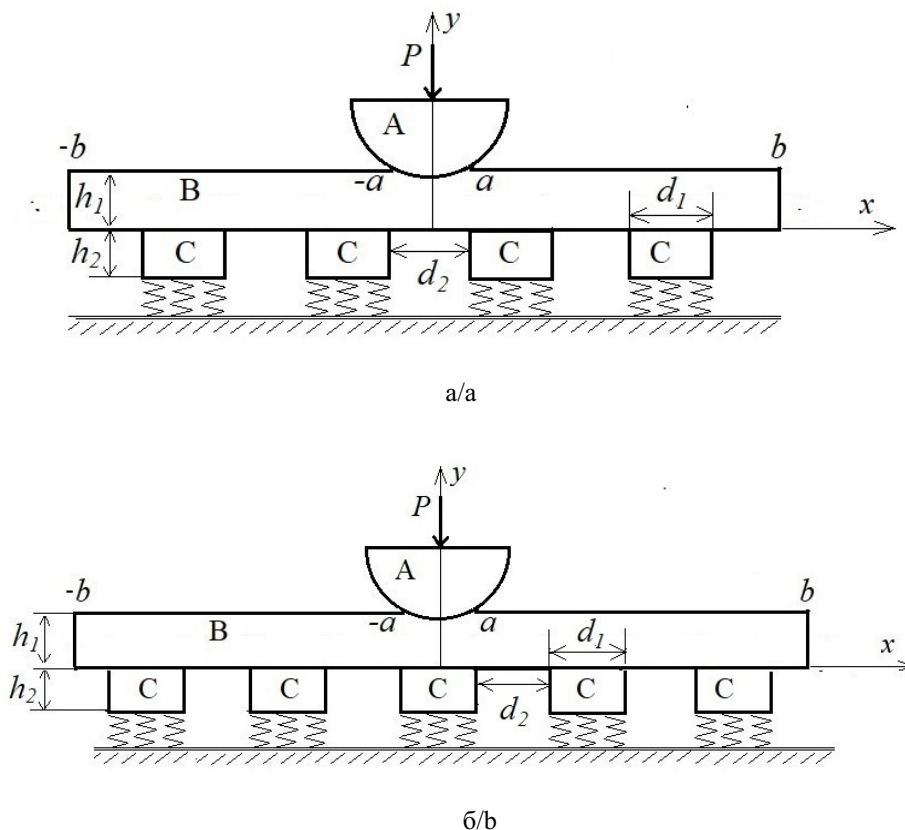


Рис. 1. Схема взаимодействия упругих тел: а – в задаче 1; б – в задаче 2
 / Fig. 1. Scheme of interaction of elastic bodies: a - in problem 1; b - in problem 2

Деформации объектов A ($k=1$), B ($k=2$) и C ($k=3$) описываются следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных [7–9]:

$$\mu_k \Delta u_k + (\lambda_k + \mu_k) \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_k}{\partial x \partial y} \right) = 0,$$

$$\mu_k \Delta w_k + (\lambda_k + \mu_k) \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w_k}{\partial y^2} \right) = 0,$$

где λ_k и μ_k – коэффициенты Ламэ; u_k и w_k – перемещения вдоль осей x и y соответственно.

Компоненты тензора напряжений в A , B и C определяются из соотношений:

$$\sigma_x^k = \frac{\mu_k}{c_k^2} \left[\frac{\partial u_k}{\partial x} + (1 - 2c_k^2) \frac{\partial w_k}{\partial y} \right],$$

$$\sigma_y^k = \frac{\mu_k}{c_k^2} \left[(1 - 2c_k^2) \frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial w_k}{\partial y} \right],$$

$$\tau_{xy}^k = \mu_k \left(\frac{\partial u_k}{\partial y} + \frac{\partial w_k}{\partial x} \right),$$

Здесь использованы обозначения [7–9]: $c_k^2 = \frac{\mu_k}{\lambda_k + 2\mu_k} = \frac{1 - 2\nu_k}{2(1 - \nu_k)}$, где ν_k ($k=1,2,3$) – коэффициенты Пуассона, соответственно, объектов A , B и C .

Предполагаем, что к штампу A на границе $y=h_1+R$ приложена равномерно распределенная нагрузка $p(x)=p=const$, суммарно эквивалентная величине $P=2Rp$. В этом случае штамп A будет

перемещаться поступательно. Будем полагать, что на всей границе объектов A , B и C отсутствуют касательные напряжения, в зоне контакта $|x| \leq a$ на объектах A и B , а также в зонах контакта объектов B и C равны по модулю нормальные напряжения. Вне зон контакта на поверхностях объектов B и C отсутствуют нормальные напряжения.

Граничные условия поставленных задач при $y=h_1$ и $y=R+h_1$:

$$\tau_{xy}^2 = 0 \quad (y = h_1), \quad \sigma_y^1 = -\sigma_y^2 \quad (y = h_1, |x| \leq a), \quad \sigma_y^1 = 0 \quad (y = h_1, |x| > a),$$

$$\sigma_y^1 = -p, \quad \tau_{xy}^1 = 0 \quad (y = R + h_1),$$

где $2a$ – размер области контакта.

Граничные условия задачи 1 при $y=0$ и $x \geq 0$:

$$\sigma_y^2 = -\sigma_y^3, \quad \tau_{xy}^2 = \tau_{xy}^3 = 0 \quad (y = 0, \quad x_i \leq x \leq x_i + d_1) \quad (i = 0, 1, \dots, N),$$

где $x_i = d_2/2 + (d_1 + d_2)i$, $2N$ – количество прямоугольников C .

Соответственно, граничные условия при $y = 0, x \leq 0$ будут симметричны относительно $x = 0$.

Граничные условия задачи 2 при $y=0$ и $x \geq 0$:

$$\sigma_y^2 = -\sigma_y^3, \quad \tau_{xy}^2 = \tau_{xy}^3 = 0 \quad (y = 0, \quad 0 \leq x \leq d_1/2, \quad x_i \leq x \leq x_i + d_1) \quad (i = 0, 1, \dots, N),$$

где $x_i = d_1/2 + d_2 + (d_1 + d_2)i$, $2N+1$ – количество прямоугольников C .

Граничные условия при $y = 0, x \leq 0$ симметричны относительно $x = 0$.

На цилиндрической поверхности штампа A вне зоны контакта отсутствуют нормальные и касательные напряжения

$$\sigma_r^1 = 0, \quad \tau_{r\phi}^1 = 0 \quad ((y - R - h_1)^2 + x^2 = R^2, \quad a \leq |x| \leq R).$$

Здесь r, ϕ – цилиндрические координаты с центром в точке $x = 0, y = R + h_1$, $-\pi \leq \phi \leq 0$.

На границах $y = -h_2$ объекты C взаимодействуют с винклеровским основанием с коэффициентом постели β . Граничные условия также симметричны относительно $x = 0$ и при $x \geq 0$ примут вид для задачи 1 – $\sigma_y^3 = \beta w^3, \tau_{xy}^3 = 0 \quad (y = -h_2, \quad x_i \leq x \leq x_i + d_1) \quad (i = 0, 1, \dots, N), \quad x_i = d_2/2 + (d_1 + d_2)i$, для задачи 2 – $\sigma_y^3 = \beta w^3, \tau_{xy}^3 = 0 \quad (y = -h_2, \quad 0 \leq x \leq d_1/2, \quad x_i \leq x \leq x_i + d_1) \quad (i = 0, 1, \dots, N),$
 $x_i = d_1/2 + d_2 + (d_1 + d_2)i$.

Конечно-элементная модель

Учитывая достаточно сложную геометрическую модель поставленной задачи, для ее исследования применим метод конечных элементов. В качестве программного инструментария при конечно-элементном моделировании использовался пакет ANSYS. Разработан комплекс программ на макроязыке APDL ANSYS, позволяющий решать рассматриваемую задачу при различных значениях геометрических и физических входных параметров. Построение геометрических моделей осуществлялось с использованием технологии моделирования «снизу вверх» посредством следующих действий: задание опорных точек; построение дуг и прямых линий, соединяющих опорные точки; построение областей по опорным точкам и линиям. В соответствии с методологией решения контактных задач аналогично [10, 11] при построении сетки конечных элементов обеспечивалось сгущение разбиения вблизи некоторых зон контакта. Для этого были дополнительно выделены геометрические подобласти, для которых задавалась регулярная конечно-элементная сетка меньшего размера по сравнению с остальной областью.

В областях, занимаемых упругими материалами объектов (в случае контакта трех видов деформируемых тел и задания полной геометрии), использовались плоские восьмиузловые структурные конечные элементы PLANE82 пакета ANSYS с опцией плоского деформирования, а в качестве контактных пар – конечные элементы TARGE169 и CONTA175. Контактные элементы задаются на границах кусочно-однородной конструкции в предполагаемых областях контакта – на границе $y=h_1$ упругого прямоугольника $0 \leq y \leq h_1$, $-b \leq x \leq b$ и границе $y=0$

упругих прямоугольников высотой h_2 , шириной d_1 . При моделировании винклеровского основания применялись конечные элементы COMBIN14, коэффициент постели задавался при помощи реальной константы.

На рис. 2 представлена конечно-элементная модель задачи 1 при $N = 2$ для некоторого варианта разбиения.

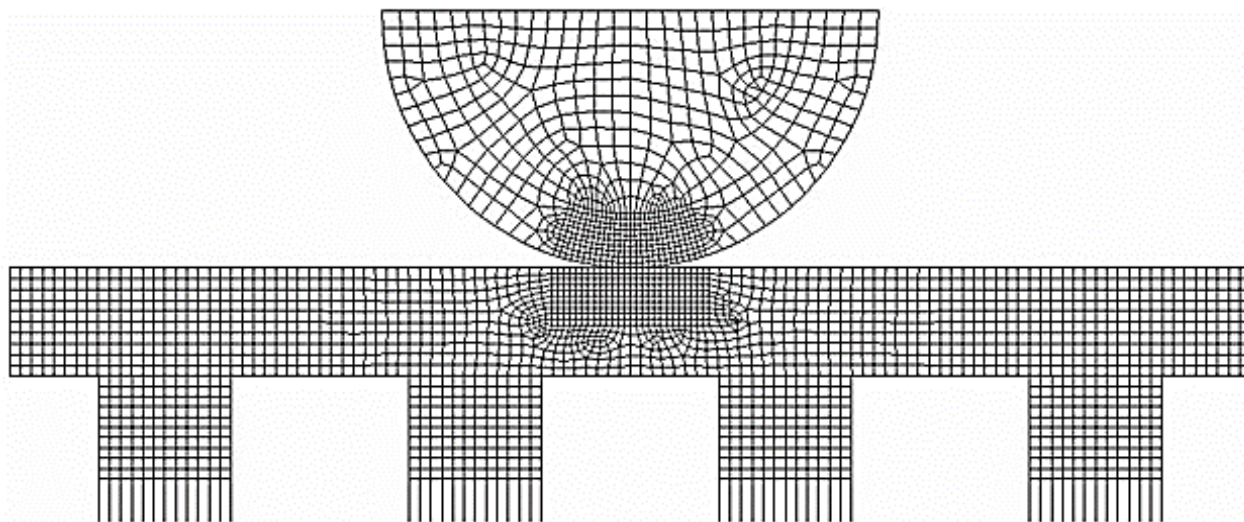


Рис. 2. Конечно-элементная модель к задаче 1 / Fig. 2. Finite element model for problem 1

Аналогично будет выглядеть конечно-элементная модель задачи 2.

В реальных расчетах принималось более мелкое разбиение, обеспечивающее сходимость результатов по перемещениям и напряжениям в зоне контакта, определенное в результате численных экспериментов.

Результаты расчетов

На основе предложенного метода решения для поставленных задач проведены расчеты контактных напряжений, перемещений штампа A и области контакта штампа A и прямоугольника B в зависимости от приложенной нагрузки и параметров взаимодействующих объектов. При расчетах модуль Юнга и коэффициент Пуассона объектов A , B и C соответственно полагались равными $E_1=2 \cdot 10^{11}$, $\nu_1=0,3$, $E_2=2 \cdot 10^{11}$, $\nu_2=0,3$, $E_3=0,16 \cdot 10^{11}$, $\nu_3=0,49$. Здесь и в дальнейшем численные значения механических и геометрических величин указаны в системе СИ. В табл. 1 и 2 для задач 1 и 2 приведены расчеты перемещения δ первоначальной точки касания штампа A и прямоугольника B , максимальных контактных напряжений q и величины области контакта a в зависимости от величины приложенной силы P и толщины h_1 прямоугольника B . При этом коэффициент постели $\beta=15 \cdot 10^7$, геометрические параметры объектов A , B и C – $R=0,9$, $b=2,25$, $d_1=0,3$, $d_2=0,2625$, $h_2=0,18$.

При проведении расчетов количество прямоугольников C выбиралось из условия, что его увеличение не влияет на результат. В данном случае для задачи 1 – $N=4$, а для задачи 2 – $N=3$.

В табл. 3 и 4 для задач 1 и 2 приведены расчеты перемещения штампа δ , максимальных контактных напряжений q и величины области контакта a в зависимости от радиуса штампа R и коэффициента постели β . При этом $d_1=0,3$, $h_1=0,2$, $h_2=0,18$, $P=200\,000$, $d_2=0,2625$.

В табл. 5 и 6 для задач 1 и 2 приведены расчеты перемещения штампа δ , максимальных контактных напряжений q , величины области контакта a в зависимости от коэффициента постели β и расстояния d_2 между прямоугольниками C . При этом $d_1=0,3$, $h_1=0,2$, $h_2=0,18$, $R=0,45$, $P=200\,000$.

Таблица 1 / Table 1

Результаты расчетов δ , q , a при изменении высоты h_1 прямоугольника B и силы P для задачи 1
/ Results of calculations δ , q , a with a variation in the height h_1 of the rectangle B
and the force P for problem 1

$P \cdot 10^{-6}$	h_1	$\delta \cdot 10^3$	$q \cdot 10^{-7}$	$a \cdot 10^4$
4	2,0	11,21	39,35	64,30
4	1,0	11,26	39,35	64,30
4	0,5	11,69	39,34	64,30
4	0,2	16,67	39,15	64,30
4	0,1	27,80	38,35	67,04
8	2,0	22,42	55,68	91,66
8	1,0	22,52	55,68	91,66
8	0,5	23,37	55,64	91,66
8	0,2	33,30	55,14	94,40
8	0,1	55,74	52,72	97,13

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчетов δ , q , a при изменении высоты h_1 прямоугольника B и силы P для задачи 2
/ Results of calculations δ , q , a with a variation in the height h_1 of the rectangle B
and the force P for problem 2

$P \cdot 10^{-6}$	h_1	$\delta \cdot 10^3$	$q \cdot 10^{-7}$	$a \cdot 10^4$
4	2,0	12,80	39,34	64,30
4	1,0	12,83	39,35	64,30
4	0,5	13,12	39,34	64,30
4	0,2	16,93	39,17	64,98
4	0,1	27,67	38,40	66,35
8	2,0	25,59	55,67	90,98
8	1,0	25,66	55,68	91,66
8	0,5	26,23	55,65	91,66
8	0,2	33,82	55,15	93,71
8	0,1	55,08	52,97	96,45

Таблица 3 / Table 3

Результаты расчётов δ , q , a при изменении радиуса R штампа A и коэффициента постели β
для задачи 1 / Results of calculations δ , q , a with a variation in the radius R
of the stamp A and the coefficient of subgrade resistance β for problem 1

$\beta \cdot 10^{-7}$	R	$\delta \cdot 10^3$	$q \cdot 10^{-7}$	$a \cdot 10^4$
2,7	0,2	3,451	18,65	6,840
7,5	0,2	1,437	18,65	6,840
15	0,2	0,836	18,64	6,840
2,7	0,45	3,451	12,41	10,26
7,5	0,45	1,437	12,41	10,26
15	0,45	0,835	12,47	10,26
2,7	0,7	3,451	9,979	13,00
7,5	0,7	1,437	9,979	13,00
15	0,7	0,835	9,979	13,00
2,7	0,9	3,450	8,780	14,36
7,5	0,9	1,436	8,780	14,36
15	0,9	0,835	8,781	14,36

Таблица 4 / Table 4

Результаты расчётов δ , q , a при изменении радиуса R штампа A и коэффициента постели β для задачи 2 / Results of calculations δ , q , a with a variation in the radius R of the stamp A and the coefficient of subgrade resistance β for problem 2

$\beta \cdot 10^{-7}$	R	$\delta \cdot 10^3$	$q \cdot 10^{-7}$	$a \cdot 10^4$
2,7	0,2	3,780	18,62	6,840
7,5	0,2	1,505	18,62	6,840
15	0,2	0,848	18,63	6,840
2,7	0,45	3,779	12,41	10,26
7,5	0,45	1,505	12,41	10,26
15	0,45	0,848	12,41	10,26
2,7	0,7	3,779	9,962	13,00
7,5	0,7	1,505	9,970	13,00
15	0,7	0,848	9,972	13,00
2,7	0,9	3,779	8,779	15,05
7,5	0,9	1,505	8,779	15,05
15	0,9	0,848	8,780	15,05

Таблица 5 / Table 5

Результаты расчётов δ , q , a при изменении коэффициента постели β и расстояния d_2 между прямоугольниками C для задачи 1 / Results of calculations δ , q , a with a variation in the coefficient of subgrade resistance β and the distance d_2 between rectangles C for problem 1

$\beta \cdot 10^{-7}$	d_2	$\delta \cdot 10^3$	$q \cdot 10^{-7}$	$a \cdot 10^4$
2,7	0,1922	3,338	12,45	10,26
7,5	0,1922	1,344	12,45	10,26
15	0,1922	0,764	12,45	10,26
2,7	0,1219	3,250	12,45	10,26
7,5	0,1219	1,267	12,45	10,26
15	0,1219	0,610	12,45	10,26

Таблица 6 / Table 6

Результаты расчётов δ , q , a при изменении коэффициента постели β и расстояния d_2 между прямоугольниками C для задачи 2 / Results of calculations δ , q , a with a variation in the coefficient of subgrade resistance β and the distance d_2 between rectangles C for problem 2

$\beta \cdot 10^{-7}$	d_2	$\delta \cdot 10^3$	$q \cdot 10^{-7}$	$a \cdot 10^4$
2,7	0,1922	3,701	12,42	10,26
7,5	0,1922	1,435	12,44	10,26
15	0,1922	0,789	12,44	10,26
2,7	0,1219	3,640	12,42	10,26
7,5	0,1219	1,379	12,43	10,26
15	0,1219	0,739	12,44	10,26

Для наглядности на рис. 3 приведены фрагменты результатов расчетов эквивалентных напряжений в окрестности области контакта штампа A и прямоугольника B для задач 1 и 2 в частном случае, когда $P=8\ 000\ 000$, $h_1=0,08$, $h_2=0,18$, $d_1=0,3$, $d_2=0,2625$, $R=0,9$.

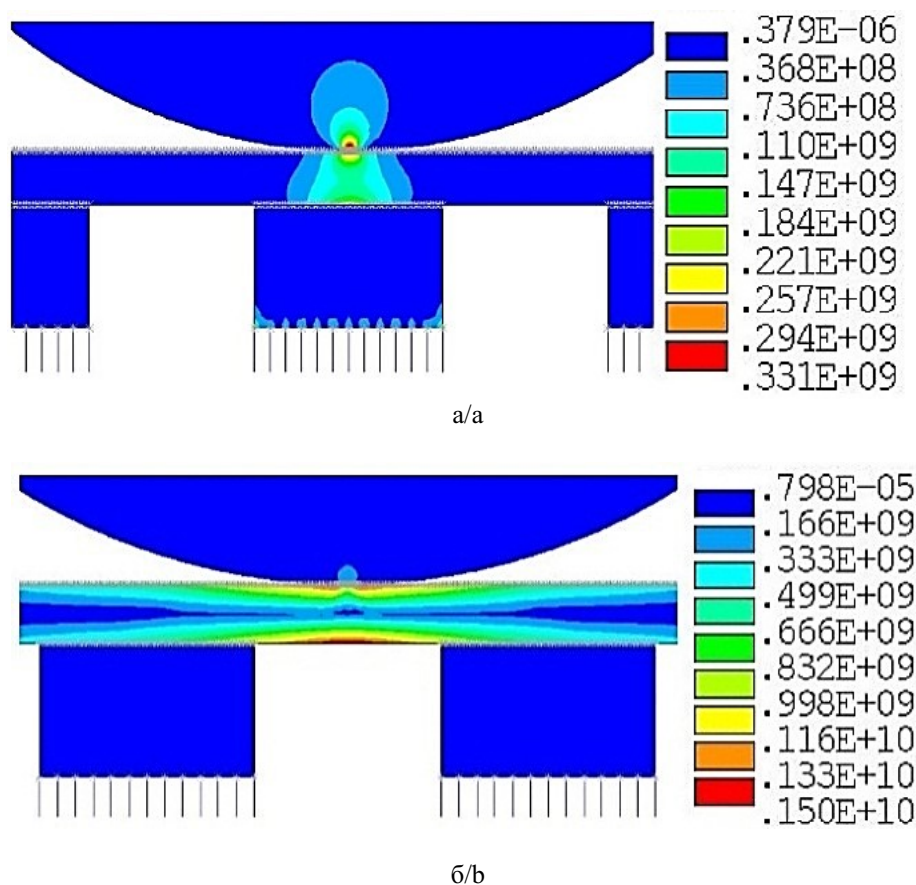


Рис. 3. Эквивалентные напряжения: а – задача 1; б – задача 2
 / Fig. 3. Equivalent stresses: a - in problem 1; b - in problem 2

Выводы

Анализ проведенных результатов расчета (табл. 1–6) показал, что с уменьшением высоты h_1 прямоугольника A при фиксированных значениях других параметров перемещение δ первоначальной точки касания штампа A и прямоугольника B увеличивается, при этом максимальные напряжения q в зоне контакта и область контакта мало изменяются. Следует отметить, что в задаче 2 перемещения δ больше, чем в задаче 1 при одинаковых значениях других параметров. Это связано с тем, что в задаче 2 винклеровское основание сильнее деформируется из-за концентрации нагрузки на одном из прямоугольников C .

При увеличении расстояния между прямоугольниками C перемещение штампа δ увеличивается, при этом при одних и тех же параметрах в задаче 2 они больше. При увеличении радиуса штампа максимальные контактные напряжения уменьшаются, а область контакта увеличивается.

Эквивалентные напряжения, как показано на рис. 3, в случае задачи 1 больше, чем для задачи 2.

Список источников

1. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука, 1980. 303 с.
2. Ворович И.И., Александров В.М., Бабешко В.А. Неклассические смешанные задачи теории упругости. М.: Наука, 1974. 456 с.
3. Александров В.М., Мхитарян С.М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. М.: Наука, 1983. 488 с.
4. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 304 с. EDN: UGLEYT.
5. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of a stamp and a poroelastic strip lying on a winkler base // Mechanics of Composite Materials. 2024. Vol. 59, № 6. P. 1169–1180. EDN: EFIQYJ. <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10164-0>

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

7. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 708 с.

8. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.

9. Рекач В.Г. Руководство к решению задач теории упругости. М.: Высшая школа, 1977. 216 с.

10. Богдаш А.И., Гладышева Т.В., Колосова Е.М., Наседкин А.В. О некоторых особенностях конечно-элементного решения контактных задач для неоднородных сред // Современные проблемы механики сплошной среды: тр. X Междунар. конф. (Ростов-на-Дону, 5–9 декабря 2006 г.) Ростов н/Д.: ЦВВР, 2007. Т. 2. С. 78–82.

11. Колосова Е.М., Наседкин А.В., Чебаков М.И. Решение статических контактных задач для трехмерных тел канонической формы : учеб.-метод. пособие. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2009. 32 с.

References

1. Galin L.A. *Contact problems of theory of elasticity and viscoelasticity*. Moscow: Science; 1980. 303 p. (In Russ.).

2. Vorovich I.I., Aleksandrov V.M., Babeshko V.A. *Nonclassical mixed problems of elasticity theory*. Moscow: Science; 1974. 456 p. (In Russ.).

3. Aleksandrov V.M., Mkhitarian S.M. *Contact problems for bodies with thin coatings and interlayers*. Moscow: Science; 1983. 488 p. (In Russ.).

4. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Analytical methods in contact problems of elasticity theory*. Moscow: Publishing House of Physical, Mathematical and Technical Literature; 2004. 304 p. (In Russ.). EDN: UGLEYT.

5. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of a stamp and a poroelastic strip lying on a Winkler base. *Mechanics of Composite Materials*. 2024;59(6):1169-1180. EDN: EFIQYJ. <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10164-0>

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

7. Muskhelishvili N.I. *Some basic problems of the mathematical theory of elasticity*. Moscow: Science; 1966. 708 p. (In Russ.).

8. Novatsky V. *Theory of elasticity*. Moscow: World; 1975. 872 p. (In Russ.).

9. Rekach V.G. *Guide to solving problems of elasticity theory*. Moscow: Graduate School; 1977. 216 p. (In Russ.).

10. Bogush A.I., Gladysheva T.V., Kolosova E.M., Nasedkin A.V. On some features of the finite element solution of contact problems for inhomogeneous media. *Modern problems of continuum mechanics*. Proceedings of the 10th International Conference. Rostov-on-Don, 5th-9th December 2006. Rostov-on-Don: CVVR; 2007;2:78-82. (In Russ.).

11. Kolosova E.M., Nasedkin A.V., Chebakov M.I. *Solution of static contact problems for three-dimensional bodies of canonical shape*. Study guide for practical training. Rostov-on-Don: Publishing House of SFedU; 2009. 32 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 06.05.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 06.05.2025; approved after reviewing 29.05.2025; accepted for publication 11.11.2025.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 551.583:631.559

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-34-45>

АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ ОТРАСЛЕВОГО УРОВНЯ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА

Б.А. Ашабоков¹, Г.В. Куповых², А.А. Ташилова³, М.В. Барекова⁴, Л.А. Кешева⁵✉, Н.В. Теунова⁶

^{1, 3, 4, 5, 6} *Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия*

¹ *Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН, Нальчик, Россия*

² *Южный федеральный университет, Таганрог, Россия*

¹ *ashabokov.boris@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>*

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

³ *tashilovaa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>*

⁴ *mbarekova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7959-5187>*

⁵ *kesheva.lara@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>*

⁶ *nata0000@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>*

Аннотация. Изложен алгоритм адаптации системы производства сельхозпродукции к изменению климата, который основан на трансформации существующих комплексов производства различных уровней в структуры, обладающие адаптивными свойствами к изменению климата. Отмечено, что в результате решения данной проблемы должна быть получена эффективно функционирующая иерархическая система, элементами которой являются системы производства сельхозпродукции регионального уровня. Она должна обеспечить не только продовольственную безопасность страны, а связанные с ней отрасли – сырьем, но и активное участие России в глобальной продовольственной безопасности. Сформулированы задачи алгоритма, предложены методы их решения.

Ключевые слова: изменение климата, адаптация, производство сельхозпродукции, отраслевой уровень, декомпозиция, синтез

Для цитирования: Ашабоков Б.А., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Барекова М.В., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Адаптация системы производства сельхозпродукции отраслевого уровня к изменению климата // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 34–45. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-34-45>

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

Original article

ADAPTATION OF SECTOR-LEVEL AGRICULTURE PRODUCTION SYSTEMS TO CLIMATE CHANGE

B.A. Ashabokov¹, G.V. Kupovykh², A.A. Tashilova³, M.V. Barekova⁴, L.A. Kesheva^{5✉}, N.V. Teunova⁶

^{1, 3, 4, 5, 6} High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

¹Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkarian Scientific Center, RAS, Russia

² Southern Federal University, Taganrog, Russia

¹ashabokov.boris@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

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

³tashilovaa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴mbarekova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7959-5187>

⁵kesheva.lara@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁶nata0000@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

Abstract. The article presents an algorithm for adapting the agricultural production system to climate change, which is based on the transformation of existing agricultural production systems of various levels into systems with adaptive properties to climate change. It is noted that as a result of solving this problem, an effectively functioning hierarchical system should be obtained, the elements of which are agricultural production systems at the regional level. At the same time, it should be able to achieve the goals set before them, which are not limited to ensuring food security of the country. The system should be able to provide the industries associated with it with raw materials and, in addition, active participation of Russia in ensuring global food security. The objectives of this problem are formulated, methods for their solution are proposed.

Keywords: climate change, adaptation, agricultural production, industry level, decomposition, synthesis

For citation: Ashabokov B.A., Kupovykh G.V., Tashilova A.A., Barekova M.V., Kesheva L.A., Teunova N.V. Adaptation of Sector-Level Agriculture Production Systems to Climate Change. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):34-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-34-45>

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

Введение

Последствия глобального потепления климата в современном мире могут оказаться особенно значительными для систем производства сельхозпродукции на всех уровнях, что влияет на обеспечение продовольственной безопасности общества, включая глобальную продовольственную безопасность. Под данными системами ниже понимаются структуры, основным элементом которых является растениеводческая отрасль, а вспомогательными – отрасли, обеспечивающие растениеводство средствами производства, защиты растений от болезней и вредителей, удобрениями, комплекс подготовки специалистов и обеспечения научно-технологическими достижениями и т.д.

Из работ, посвященных исследованию климатических изменений условий производства растениеводческой продукции, можно отметить [1–7]. В [1], например, приведены результаты анализа колебания температуры и осадков в разные сезоны года и в различных климатических зонах юга европейской территории России (ЕТР). Показано, что преобразование отмеченных метеорологических параметров уже в состоянии заметно повлиять на показатели производства продукции, и если такая тенденция в их динамике сохранится, то большинство регионов юга ЕТР до середины нынешнего столетия окажется в зоне средней и сильной засухи. Такая тенденция наблюдается и в других регионах страны.

Крайне негативными могут оказаться и последствия экстремальных погодных явлений для производства всех отраслей, в том числе сельскохозяйственной, интенсивность и повторяемость которых увеличиваются вследствие изменения климата [1, 8]. В условиях юга ЕТР наиболее важными из этих явлений можно считать градобитие, высокие температуры и нехватку влаги в почве [1].

Высокая чувствительность сельского хозяйства к трансформации климата делает создание иерархической системы производства сельхозпродукции отраслевого уровня, обладающей адаптивными свойствами к колебаниям внешней среды, необходимым условием продовольственной безопасности [1, 8–12]. Системы, не прошедшие процесс адаптации к изменениям климата, будут разрушены [13]. Следует иметь в виду, что последствия эволюции климата не ограничиваются трансформацией природно-климатических условий производства сельхозпродукции. Существенным образом будут меняться производственно-экономические, демографические, экологические, политические и другие условия функционирования системы производства сельхозпродукции на всех уровнях. Несмотря на актуальность проблемы адаптации различных сфер деятельности [6], в РФ основное внимание уделяется развитию оценочных и мониторинговых мероприятий.

Алгоритм адаптации системы производства сельхозпродукции отраслевого уровня к изменению климата

Адаптация различных сфер деятельности к изменению климата связана с решением большого круга задач. В зависимости от цели решения они объединяются в группы. В проблеме адаптации систем производства сельхозпродукции задачи группируются следующим образом:

1. Формирующие план адаптации системы к изменению климата.
2. Направленные на снижение влияния функционирования системы на климат.
3. Ориентированные на уменьшение неблагоприятного влияния изменения климата на функционирование системы.
4. Позволяющие использовать благоприятные последствия изменения климата для повышения эффективности системы.

Важно отметить, что задачи в этих группах будут отличаться в некоторых деталях на уровне регионов.

Длина интервала адаптации не может превышать длины отрезка времени, на котором могут быть найдены достаточно надежные решения задач плана адаптации. В случае систем производства сельхозпродукции данный интервал, по нашему мнению, не может превышать 5–7 лет [1].

В алгоритме предполагается, что в удовлетворении потребностей страны в продукции сельского хозяйства принимают участие все её элементы. Очевидно, что система отраслевого уровня (СОУ) является вышестоящей по отношению к её элементам (региональные системы), и, несмотря на то что системы этих уровней взаимосвязаны между собой, задачи, возникающие на пути их адаптации, методы их решения, цели адаптации различаются существенным образом.

Алгоритм состоит из двух этапов:

- определение на качественном уровне целей систем производства сельхозпродукции отраслевого и регионального уровня, номенклатуры сельхозкультур и структуры их производства на региональном уровне, обеспечивающих достижение целей систем;
- синтез СОУ.

Рассмотрим основные задачи первого этапа:

1. Одна из трудностей, возникающих на пути адаптации, связана со сложностью структуры сельского хозяйства, к которому относятся такие отрасли, как растениеводство, животноводство, овощеводство, садоводство и другие, в каждой из них производится достаточно широкая номенклатура продукции. Например, перечень сельхозкультур, производство которых необходимо для обеспечения продовольственной безопасности РФ, включает в себя 46 наименований [14]. Адаптация такой системы действительно сложна, поэтому одной из задач первого этапа можно считать упрощение данной системы с учетом особенностей рассматриваемой задачи.

2. К задачам первого этапа можно отнести и декомпозицию системы производства сельхозпродукции отраслевого уровня. Для упрощения проблемы адаптации системы на первом этапе, по нашему мнению, следует ограничиться декомпозицией её на региональные системы производства сельхозкультур: $s_1, s_2, s_3, \dots, s_K$ (рис. 1).

В различных частях регионов условия функционирования региональных систем, включая природно-климатические, могут различаться существенным образом и, как следствие, будут различаться и производственно-экономические показатели производства продукции. Это означает, что адаптация таких регионов требует деления их территорий на части, в которых условия производства продукции являются относительно однородными. Проблема адаптации региональной

системы в этом случае должна быть рассмотрена отдельно для каждой части региона с учётом взаимосвязей между ними. В таких случаях декомпозиция региональных систем должна быть продолжена на региональном уровне.

В различных частях регионов условия функционирования региональных систем, включая природно-климатические, могут различаться существенным образом и, как следствие, будут различаться и производственно-экономические показатели производства продукции. Это означает, что адаптация таких регионов требует деления их территорий на части, в которых условия производства продукции являются относительно однородными. Проблема адаптации региональной системы в этом случае должна быть рассмотрена отдельно для каждой части региона с учётом взаимосвязей между ними. В таких случаях декомпозиция региональных систем должна быть продолжена на региональном уровне.

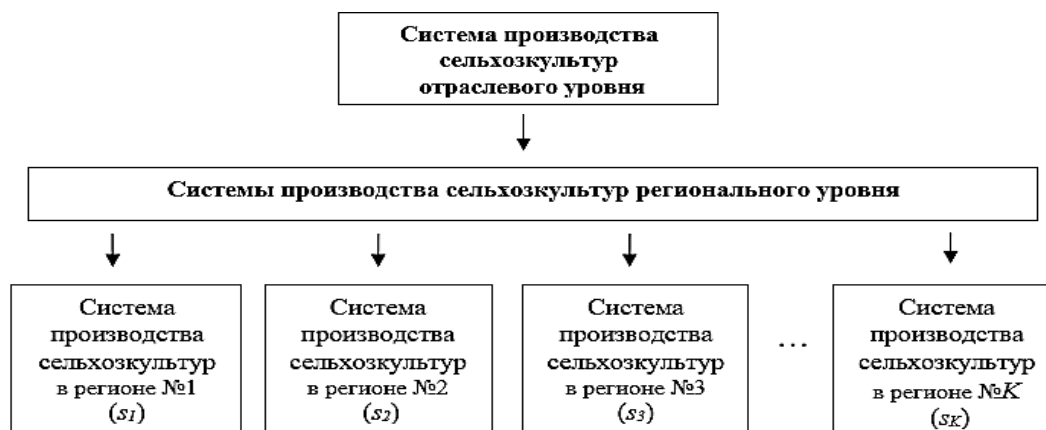


Рис. 1. Декомпозиция отраслевой системы производства сельхозкультур
 / Fig. 1. Decomposition of the sectoral system of agricultural crop production

3. Следующей задачей данного этапа выступает формирование целей систем регионального уровня. В результате адаптации существующая отраслевая система должна быть трансформирована в систему, цель которой заключается в удовлетворении потребностей страны в продукции сельского хозяйства на заданном отрезке времени (интервал адаптации), т.е. цель формулируется на качественном уровне. При этом одна часть культур исходной системы производится и в новой системе, а другая может быть заменена. Процесс замены культур другими, более устойчивыми к новым природно-климатическим условиям должен быть постоянным. Выведением таких культур должны заниматься научно-исследовательские учреждения всех уровней.

Возникновение данной задачи связано с тем, что формулировка целей иерархических систем требует перехода от целей вышестоящей системы, носящих качественный характер, к целям нижестоящих систем в количественном выражении, т.е. определяются объемы производства сельхозкультур региональными системами, необходимые для достижения целей СОУ. Эти цели должны быть достигнуты совместно с региональными системами. При этом цели систем регионального уровня задаются системами управления обоих уровней (с учетом имеющихся ресурсов, как на отраслевом, так и на региональном уровне), т.е. устанавливаются объемы производства сельхозкультур региональными системами и необходимые ресурсы. Объемы для достижения целей систем отраслевого и регионального уровней желательно заранее оценить, изложить их значения (по годам) в стратегиях развития этих систем. Это позволит принимать заблаговременные решения, повышающие эффективность производства сельскохозяйственной продукции.

4. Следующая задача связана с предыдущей и заключается в подборе сельхозкультур и примерной структуры их производства, позволяющих достигнуть цели региональных систем, в определении тех мероприятий, с помощью которых урожайности культур, формирующиеся под влиянием природных факторов, могут быть доведены до целевых показателей.

Тогда, обозначая через N количество сельхозкультур, которые производятся в СОУ (или в сельском хозяйстве страны), запишем требования к объему их производства:

$$a_i \geq a_i^0, (i = 1, 2, 3, \dots, N), \quad (1)$$

где a_i^0 – минимальный (заданный) объем производства i -й сельхозкультуры, при котором цель отраслевой системы по производству данной культуры будет достигнута.

Допустим, что сельхозкультуры производятся в K регионах в объемах a_{ik} , ограничения для объемов производства сельхозкультур a_i^0 ($i=1, 2, 3, \dots, N$):

$$\sum_{k=1}^K a_{ik} \geq a_i^0, \quad i=1, 2, 3, \dots, N. \quad (2)$$

Таким образом, возникает задача оптимального распределения значений a_i^0 ($i=1,2,3,\dots, N$) между регионами.

5. При формировании ограничений (1), (2) должно учитываться участие России в обеспечении глобальной продовольственной безопасности. Поэтому нужна оценка доли i -й сельхозкультуры в a_i^0 ($i=1, 2, 3, \dots, N$), необходимой для достижения такой цели.

Также для (1), (2) требуется проведение анализа и прогноза спроса и предложения сельхозпродукции на внешнем рынке (отраслевой уровень). Среди условий внешней среды (природные, экономические, политические, социальные, демографические и т.д.) могут оказаться и такие, прогнозирование которых затруднено или невозможно, что становится источником неопределенностей и затрудняет формулировку целей адаптации систем как отраслевого, так и регионального уровней.

6. К обязательным требованиям к СОУ относятся:

- влияние функционирования системы на климат на интервале адаптации должно находиться в допустимых пределах;
- воздействие изменения климата на функционирование системы на этом же интервале соответствует границам.

Отсюда возникает необходимость представления этих требований в виде, позволяющем учитывать их в моделях систем различных уровней. Для учета первого из них в модели функционирования СОУ нужно использовать взятые РФ обязательства по выполнению решений Парижской конференции по климату [12, 13, 15]. Зная углеродный след от производства единицы массы i -й культуры q_i , данное требование можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K Y_{ik} S_{ik} q_{ik} \leq Q, \quad (3)$$

где Y_{ik} , S_{ik} – урожайность и площадь производства i -й культуры в k -м регионе; Q – допустимый углеродный след СОУ.

Значения q_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$) определяются на основе полевых экспериментов. Предполагается, что снижение значений Q , а затем и удержание их в допустимых пределах возможны различными способами, например путем внедрения климатосберегающих технологий производства сельхозкультур, замены той или иной культуры на другую с меньшим углеродным следом и др. Из неравенства (3) видно, что данное требование должно выполняться для СОУ. Для отдельных ее элементов или культур оно может не выполняться.

7. Для учета второго требования необходимо проведение анализа и прогноза изменения климата на интервале адаптации, а также определение основных механизмов его влияния на производство сельхозпродукции, включая экстремальные погодные явления. Эта информация нужна для заблаговременного принятия решений о снижении влияния изменения климата на отмеченные системы. Решение данной задачи необходимо и на втором этапе адаптации СОУ. При этом должны быть определены погодные явления, характерные для каждого региона, и использованы соответствующие методы снижения связанных с ними потерь.

Таким образом, на первом этапе адаптации СОУ на качественном уровне определяется ее структура, формулируются цели систем отраслевого и регионального уровней, определяются комплекс сельхозкультур и структуры их производства в регионах, позволяющие достигнуть цели систем отмеченных уровней.

Задачи второго этапа адаптации СОУ к изменению климата

Остановимся на задачах второго этапа адаптации системы производства сельхозкультур отраслевого уровня к изменению климата, где качественные результаты первого этапа преобразуются в количественные.

1. Важнейшей задачей данного этапа является адаптация к изменению регионального климата систем производства сельхозкультур с использованием результатов, полученных на предыдущем этапе. Рассмотрим проблемы адаптации систем (растениеводство – перерабатывающая отрасль) регионального уровня к изменению климата.

Основные задачи плана адаптации данной системы сформулированы в [1] и кратко изложены ниже:

- 1) анализ и прогноз изменений климата и динамики климатических факторов;
- 2) анализ и прогноз трансформаций условий внешней среды;
- 3) разработка модели системы растениеводство – перерабатывающая отрасль;
- 4) решение задачи согласования целевых индикаторов развития системы растениеводство – перерабатывающая отрасль;
- 5) построение моделей агроклиматических ресурсов (урожайность культур, формирующаяся природными факторами);
- 6) определение климатосберегающих агротехнических мероприятий;
- 7) разработка метода и определение развития системы растениеводство – перерабатывающая отрасль с учетом изменений агроклиматических ресурсов;
- 8) усовершенствование имеющихся и разработка новых методов снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с экстремальными погодными явлениями;
- 9) оптимизация структуры вспомогательных служб с учетом изменения климата.

Как было отмечено, адаптивные свойства должны передаваться СОУ от систем регионального уровня, которые в данной проблеме играют роль элементарных систем. Анализ перечисленных задач плана адаптации показывает, что адаптивные свойства приобретаются системами регионального уровня в результате реализации мероприятий, определяемых в результате решения задач 5–7. Поэтому в краткой форме остановимся на методах их решения.

2. При построении моделей агрометеорологических ресурсов (задача 5) предполагалось, что формирование урожаев сельхозкультур существенным образом зависит от сезонных значений агрометеорологических факторов. В реальных условиях урожайность сложным образом зависит от комбинации многих факторов. Отсюда при записи моделей агрометеорологических ресурсов предполагалось, что они могут быть представлены как произведение функций, описывающих их зависимость от агрометеорологических факторов в различные сезоны года. Этапы построения модели подробно описаны в [1]. Модель урожайности озимых культур, формирующаяся этими факторами, записывается в виде

$$y = Y_0 T_B^{a_1} T_L^{a_2} e^{-\frac{T_L}{T_3}} T_0^{a_3} T_3^{a_4} (p_0 + p_3)^{b_1} (p_3 + p_B)^{b_2} (p_B + p_L)^{b_3}, \quad (4)$$

в случае яровых культур –

$$y = Y_0 T_B^{a_1} T_L^{a_2} e^{-\frac{T_L}{T_3}} (p_3 + p_B)^{b_1} (p_B + p_L)^{b_2}, \quad (5)$$

где T_3, T_B, T_L, T_0 – среднесезонные температуры воздуха, К; T_3 – эффективная температура воздуха (благоприятная для развития сельхозкультуры), К; p_3, p_B, p_L, p_0 – сумма осадков в эти же сезоны, мм. Параметры Y_0, a_1, a_2, a_3, a_4 и b_1, b_2, b_3 в (4), (5) подлежат вычислению.

При построении модели использовались данные об урожайности культур, формирующейся природными факторами, а именно за 20-летний период времени с начала 90-х гг. XX в., когда использование удобрений и химических средств защиты растений в стране было минимальным.

3. Очевидно, что достижение целей производства региональной системой требует доведения фактической урожайности культур y^{ϕ}_i (значения функций (4), (5)) до целевых индикаторов y^u_i (значения урожайности культур, необходимые для достижения целей региональных систем), т.е. необходимо обеспечение следующего условия:

$$y^u_i - y^{\phi}_i \geq \Delta y_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N), \quad (6)$$

где Δy_i – минимальная прибавка урожайности i -й культуры, которую следует обеспечить для достижения целей региональной системы производства сельхозкультур.

Отсюда возникает задача 6 о климатосберегающих агротехнических мероприятиях, позволяющих довести значения y в (4), (5) до целевых индикаторов и выше. В результате решения этой задачи производство сельхозкультур адаптируется к природно-климатическим условиям конкретного года из интервала адаптации, а при решении задач 6 и 7 находится траектория адаптированной к изменению климата региональной системы на интервале адаптации. Очевидно, что эти задачи должны быть решены для каждого региона.

4. Остановимся на методе определения траектории системы растениеводство – перерабатывающая отрасль на интервале адаптации (задача 7) [1, 9]. Очевидно, что значения функций (4), (5) будут меняться с изменением климата, и к этому должны адаптироваться мероприятия, с помо-

стью которых обеспечиваются условия (6). Поэтому по результатам решения задачи 6 сначала определяется траектория системы на интервале адаптации, которая должна корректироваться каждый год в ходе адаптации системы к изменению климата. Такой подход позволит в случае необходимости более эффективно осуществлять замену одних культур другими.

Для изложения метода на рис. 2 приведено условное изображение траектории урожайности культуры, формируемой природными факторами, и фактической ее урожайности, которую необходимо обеспечить для достижения целей системы (линии 1 и 2).

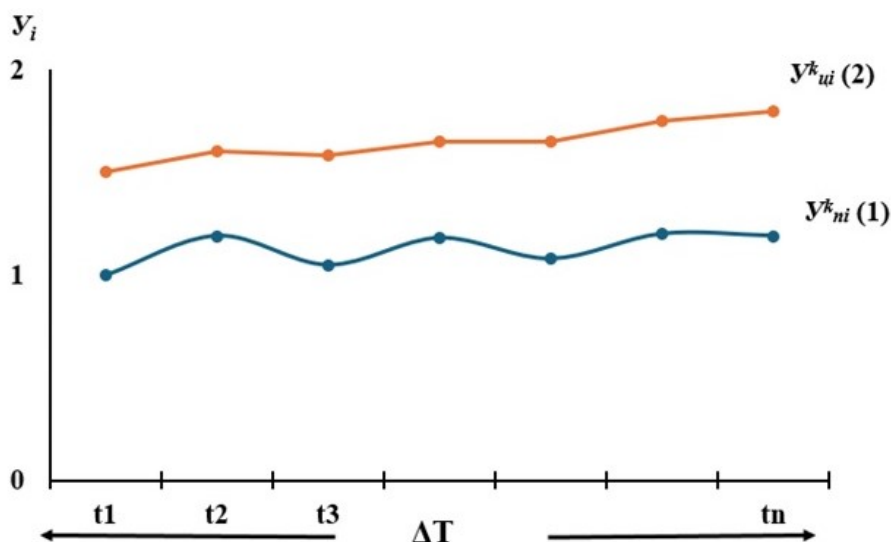


Рис. 2. Значения урожайности, необходимые для достижения цели адаптации Y^k_{ui} (линия 2), и значения формируемой природными факторами урожайности Y^k_{ni} (линия 1); ΔT – интервал адаптации сельского хозяйства к изменению климата; $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ – узлы временной сетки / Fig. 2. Values of crop yield required to achieve the adaptation goal Y^k_{gi} (line 2) and values of crop yield formed by natural factors Y^k_{ni} (line 1); ΔT – interval of adaptation of agriculture to climate change; $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ – nodes of the time grid

Цель решения задачи 6, как отмечалось, заключается в определении агротехнических мероприятий, позволяющих довести формирующуюся под влиянием природных факторов урожайность культуры (линия 1) до фактических значений (линия 2).

На интервале адаптации введем сетку t_k ($k=1, 2, 3, \dots, n$). Минимальный размер шага сетки равен 1 году. Значения фактической урожайности i -й культуры и урожайности, формируемой природными факторами, известны в узлах сетки и равны Y^k_{ui} и Y^k_{ni} . Значения Y^k_{ui} устанавливаются с учетом потребностей в i -й культуре и наличия ресурсов различных видов для ее производства, а значения Y^k_{ni} – на основе моделей (4), (5). Задача определения траектории системы (задача 4) заключается в вычислении в узлах временной сетки показателей системы производства сельхозкультур. Для этого используется модель оптимизации структуры производства культур (задача 3). В моменты времени t_k ($k=1, 2, 3, \dots, n$) фиксируются мероприятия, необходимые для доведения урожайностей культур от Y^k_{ni} до Y^k_{ui} .

5. Актуальность и трудности решения проблемы снижения потерь отрасли от экстремальных погодных явлений будут повышаться с изменением климата. Это связано с тем, что увеличение частоты и мощности этих явлений, расширение их пространственного распространения в существенной степени ограничат надежность и эффективность методов активных воздействий на облака.

Комбинация активных и пассивных методов является наиболее перспективной. Снижение потерь сельского хозяйства от градобития и аридизации сельхозугодий пассивными методами показано в [1].

Воспользуемся, например, производственно-экономическими условиями Кабардино-Балкарской Республики и определим целевые индикаторы для урожайностей культур: пшеница и зерновые – 40 ц/га, кукуруза – 60, картофель, сахарная свекла и овощи – 200, подсолнечник – 25, фрукты – 350, виноград – 35 ц/га.

Модель системы записана в рамках линейного программирования. В качестве целевой функции использовалась прибыль от реализации сельхозкультур и продуктов их переработки. В модели функционирования системы растениеводство – перерабатывающая отрасль использованы обозначения:

– x_1, x_2, \dots, x_{10} – площади под озимую пшеницу, зерновые культуры (кроме пшеницы и кукурузы), кукурузу (x_3), картофель, подсолнечник, сахарную свеклу, овощи, фрукты, виноград, лекарственные травы;

– $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{55}$ – объемы производства продукции предприятиями перерабатывающей отрасли.

Перечисленные ниже сельхозкультуры перерабатывались в следующие продукты ($x_{11} - x_{74}$, подробный перечень продуктов приведен в [1]):

- 1) пшеница ($x_{11} - x_{18}$);
- 2) зерновые ($x_{19} - x_{23}$);
- 3) кукуруза ($x_{24} - x_{29}$);
- 4) картофель ($x_{30} - x_{34}$);
- 5) свекла ($x_{35} - x_{36}$);
- 6) овощи ($x_{37} - x_{40}$);
- 7) подсолнечник ($x_{41} - x_{44}$);
- 8) фрукты ($x_{45} - x_{52}$);
- 9) виноград ($x_{53} - x_{55}$).

Затраты на переработку сельхозкультур обозначены $x_{56}-x_{65}$, тыс. р.; объемы производства сельхозкультур $x_{66}-x_{74}$, ц, шт.; объем финансовых ресурсов, требуемый для переработки сельхозкультур x_{75} , тыс. р.; объем финансовых ресурсов, необходимый для производства сельхозкультур x_{76} , тыс. р. Таким образом, в перерабатывающей отрасли производится 45 продуктов (лекарственные травы не перерабатываются). Результаты расчетов (на 1000 га) через два шага по времени (т.е. для t_3) приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Производственно-экономические показатели системы в момент времени t_3 (на 1000 га)
/ Production and economic indicators of the system at time t_3 (per 1000 ha)

Площади пашни, занимаемые сельхозкультурами, га			
$x_1 = 358,0$	$x_4 = 141,8$	$x_7 = 30,0$	$x_9 = 33,03$
$x_2 = 200,0$	$x_5 = 3,5$	$x_8 = 0,25$	$x_{10} = 0,5$
$x_3 = 148,0$	$x_6 = 53,3$		
Объемы производства продукции в перерабатывающей отрасли, ц			
$x_{11} = 877,0$	$x_{22} = 10,0$	$x_{33} = 10,0$	$x_{44} = 10,0$
$x_{12} = 14,0$	$x_{23} = 0,0$	$x_{34} = 0,0$	$x_{45} = 14,7$
$x_{13} = 1087,8$	$x_{24} = 7,7$	$x_{35} = 10,0$	$x_{46} = 0,0$
$x_{14} = 0,0$	$x_{25} = 10,0$	$x_{36} = 0,0$	$x_{47} = 10,0$
$x_{15} = 17,0$	$x_{26} = 10,0$	$x_{37} = 10,0$	$x_{48} = 0,0$
$x_{16} = 21,0$	$x_{27} = 12,0$	$x_{38} = 10,0$	$x_{49} = 2,1$
$x_{17} = 15,0$	$x_{28} = 10,0$	$x_{39} = 207,5$	$x_{50} = 10,0$
$x_{18} = 17,0$	$x_{29} = 9,44$	$x_{40} = 10,0$	$x_{51} = 10,0$
$x_{19} = 190,31$	$x_{30} = 0,0$	$x_{41} = 30,0$	$x_{52} = 10,0$
$x_{20} = 0,0$	$x_{31} = 75,1$	$x_{42} = 10,0$	$x_{53} = 10,0$
$x_{21} = 0,0$	$x_{32} = 0,0$	$x_{43} = 28,6$	$x_{54} = 3,2258$
			$x_{55} = 10,0$
Финансовые затраты на переработку сельхозкультур, тыс. р.			
$x_{56} = 8235,5$	$x_{59} = 55\,701,8$	$x_{62} = 9163,1$	$x_{64} = 600,0$
$x_{57} = 2000,0$	$x_{60} = 200,0$	$x_{63} = 264,3$	$x_{65} = 2117,5$
$x_{58} = 463,3$	$x_{61} = 1866,7$		
Объемы производства сельхозкультур, ц			
$x_{66} = 1450,3$	$x_{69} = 1627,6$	$x_{71} = 480,0$	$x_{73} = 10,0$
$x_{67} = 286,8$	$x_{70} = 70,0$	$x_{72} = 52,3$	$x_{74} = 106,0$
$x_{68} = 300,0$			
Затраты финансовых ресурсов на переработку сельхозкультур, тыс. руб.		Затраты финансовых ресурсов на производство сельхозкультур, тыс. руб.	
$x_{75} = 80\,612,1$		$x_{76} = 40\,000$	

Результаты расчетов, соответствующих концу интервала адаптации (моменту времени t_6), приведены в табл. 2. Состав сельхозкультур на интервале адаптации не изменился. В конце интервала наибольшую площадь в структуре посевов занимали пшеница ($x_1=364$ га), зерновые культуры ($x_2=200$ га), картофель ($x_4=147,8$ га). В узлах интервала наблюдается достижение целей системы производства сельхозкультур.

Затраты на переработку сельхозкультур чувствительны к структуре получаемых продуктов. Из табл. 2 видно, что производство некоторых продуктов сведено к нулю. Финансовые затраты на производство продукции перерабатывающей отрасли (80 111,8 тыс. р.) значительно больше затрат на производство сельхозкультур (25 462,7 тыс. р.). Что касается прибыли системы, то наблюдается ее увеличение: в момент времени t_3 она составляла 18 779,23 тыс. р., а в конце интервала адаптации t_6 – 19 096,6 тыс. р.

Таблица 2 /Table 2

**Показатели системы в конце интервала адаптации (t_6) (на 1000 га)
 / System indicators at the end of the adaptation interval (t_6) (per 1000 ha)**

Площади пашни под сельхозкультуры, га			
$x_1 = 364$	$x_4 = 147,8$	$x_7 = 38,0$	$x_9 = 33,0$
$x_2 = 200$	$x_5 = 3,5$	$x_8 = 0,25$	$x_{10} = 0,5$
$x_3 = 143$	$x_6 = 40,0$		
Объемы производства продукции предприятиями перерабатывающей отрасли, ц, шт.			
$x_{11} = 877$	$x_{23} = 165$	$x_{34} = 0$	$x_{45} = 14,7$
$x_{12} = 14$	$x_{24} = 10$	$x_{35} = 115$	$x_{46} = 0$
$x_{13} = 1370$	$x_{25} = 12$	$x_{36} = 0$	$x_{47} = 10$
$x_{14} = 0$	$x_{26} = 10$	$x_{37} = 141,7$	$x_{48} = 0$
$x_{15} = 10$	$x_{27} = 21$	$x_{38} = 310$	$x_{49} = 2,1$
$x_{16} = 21$	$x_{28} = 19$	$x_{39} = 10$	$x_{50} = 10$
$x_{17} = 15$	$x_{29} = 6,44$	$x_{40} = 31$	$x_{51} = 10$
$x_{18} = 10$	$x_{30} = 0$	$x_{41} = 30$	$x_{52} = 10$
$x_{19} = 190,31$	$x_{31} = 215,4$	$x_{42} = 10$	$x_{53} = 10$
$x_{20} = 10$	$x_{32} = 0$	$x_{43} = 949,2$	$x_{54} = 31$
$x_{21} = 10$	$x_{33} = 14$	$x_{44} = 10$	$x_{55} = 10$
$x_{22} = 10$			
Финансовые затраты на переработку перечисленных сельхозкультур, тыс. р.			
$x_{56} = 53310,7$	$x_{59} = 4507,7$	$x_{62} = 13809,9$	$x_{64} = 600$
$x_{57} = 2000$	$x_{60} = 2300$	$x_{63} = 1264,3$	$x_{65} = 2117,5$
$x_{58} = 463,3$	$x_{61} = 1866,7$		
Объемы производства сельхозкультур, ц, шт.			
$x_{66} = 2478,2$	$x_{69} = 200$	$x_{71} = 4140$	$x_{73} = 20$
$x_{67} = 300$	$x_{70} = 97$	$x_{72} = 300$	$x_{74} = 186$
$x_{68} = 1053,2$			
Объем финансовых ресурсов на переработку сельхозкультур, тыс. р.	Объем финансовых ресурсов на производство сельхозкультур, тыс. р.		
$x_{75} = 80\ 111,8$	$x_{76} = 25\ 462,7$		

Отметим, что на втором этапе адаптации системы производства сельхозкультур отраслевого уровня определяются численные значения потребностей в ресурсах в различных направлениях. Таким же образом выявляются значения других показателей системы, которые на качественном уровне были получены на первом этапе.

Показатели и структуры производства сельхозкультур в регионах, найденные на первом этапе, корректируются и устанавливаются их значениями. Для этой цели используется линейно-программная модель оптимизации структуры производства сельхозкультур. Для каждого региона в целевой функции и системе ограничений модели учитываются целевые показатели, которые должны быть достигнуты системой производства сельхозкультур, а также ограничения, связанные с природно-климатическими, производственно-экономическими и другими условиями производства культур.

6. Адаптация элементов отраслевой системы обеспечивает выполнение принципа её целостности. К важнейшим задачам адаптации СОУ (после решения задач адаптации региональных систем) относится синтез. В результате получают элементы отраслевой системы, адаптированные к изменению климата.

В рамках решения задачи синтеза отраслевой системы будет разработана модель, объединяющая региональные системы производства сельхозкультур для выполнения принципа целостности отраслевой системы. В этом качестве может быть использована модель оптимального распределения ограниченных ресурсов между региональными системами производства сельхозкультур.

Заключение

1. Изложен алгоритм адаптации системы производства сельхозкультур отраслевого уровня к изменению климата. Он состоит из двух этапов: декомпозиция исходной СОУ и решение задач этапа; синтез СОУ, адаптированной к изменению климата.

2. Цели адаптации отраслевой системы производства сельхозкультур, согласно алгоритму, достигаются совместно с системами регионального уровня, что требует распределения качественных целей отраслевой системы в количественные цели региональных систем производства сельхозкультур.

3. Сформулированы основные задачи отмеченных этапов алгоритма, обсуждаются и методы их решения.

4. Приводятся формулировки задач плана адаптации систем производства сельхозкультур регионального уровня к изменению климата для одной из задач второго этапа этого алгоритма адаптации.

5. Излагаются формулировки задач плана адаптации систем регионального уровня. Результаты решения этих задач должны использоваться для проведения адаптационных мероприятий. Указываются методы решения некоторых задач.

6. Адаптивные свойства передаются СОУ от адаптированных к изменению климата систем регионального уровня.

7. Представлены результаты решения некоторых задач плана адаптации к изменению климата систем регионального уровня.

Список источников

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Ташилова А.А. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Фрегат, 2020. 476 с. EDN: YCVURI.

2. Сиптиц С.О., Романенко И.А., Евдокимова Н.Е. Модельные оценки влияния климата на урожайность зерновых и зернобобовых культур в регионах России // Проблемы прогнозирования. 2021. № 2 (185). С. 75–86. EDN: CXVXSU.

3. Жемухов Р.Ш., Машукова Ф.Э. Антропогенное изменение климата и его последствия для сельского хозяйства на региональном уровне // Успехи современ. естествознания. 2016. № 7. С. 118–122. EDN: ZDGVVX.

4. Либин И.Я., Перес П., Олейник Т.Л., Прудникова Р., Трейгер Е.М. Возможное влияние глобальных изменений климата на социальные процессы и экономику России // Междунар. журн. прикл. и фундамент. исследований. 2013. № 9. С. 105–108. EDN: RBBKUP.

5. URL: <https://www.diplomatie.gouv.fr/ru/politique-etrangere/climat/la-lutte-contre-le-changement-climatique/la-conference-de-paris-ou-cop21/> (дата обращения: 25.01.2025).

6. Santos F.D., Ferreira P.L., Pedersen J.S. The Climate Change Challenge: A Review of the Barriers and Solutions to Deliver a Paris Solution // Climate. 2022. Vol. 10, № 5. Art. 75. EDN: RMMMPU. <https://doi.org/10.3390/cli10050075>

7. Зойдзе Е.К., Хомякова Т.В., Шостак З.А., Сиротенко В.Г., Овчаренко Л.И., Сухарева В.А. О проблеме адекватного агроклиматического обеспечения экономики Российской Федерации в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2010. № 8. С. 73–86. EDN: NEKTNZ.

8. Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З. Основы оптимальной адаптации экономики России к опасным проявлениям погоды и климата // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 5–14. EDN: KVKXLJ.

9. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Формирование плана адаптации регионального аграрного сектора к изменению климата: задачи и методы решения // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 10. С. 57–65. EDN: FYYVGO. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-10-57-65>
10. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В., Ашабокова М.Б. Метод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами, с учетом вероятности их появления // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2023. № 3 (219). С. 45–56. EDN: AVDLEV. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-45-56>
11. Суховеева О.Э. Адаптация землепользования к изменениям климата в России // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 12. С. 20–26. EDN: XFMBOI.
12. Clements R., Hagggar J., Quezada A., Torres J. *Technologies for Climate Change Adaptation - Agriculture Sector*. X. Zhu (Ed.). Roskilde: UNEP Risø Centre, 2011. 219 p.
13. Галкин Д. Г. Направления адаптации сельского хозяйства к последствиям глобальных климатических изменений // *Вестн. РЭУ им. Г.В. Плеханова*. 2021. Т. 18, № 2 (116). С. 13–20. EDN: FWAAYH. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2021-2-13-20>
14. Перечень родов и видов сельскохозяйственных растений, производство и выращивание которых направлено на обеспечение продовольственной безопасности Российской Федерации, сорта и гибриды которых подлежат включению в Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию : распоряжение Правительства РФ от 08.12.2022 № 3835-П. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=455887&ysclid=mj2tdq9hu0737582479> (дата обращения: 11.05.2025).
15. Месарович М., Такахага Я. *Общая теория систем: математические основы*. М.: Мир, 1978. 381 с.

References

1. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A. *Spatio-temporal climate change in the south of European Russia, assessment of its consequences, methods and models of adaptation of the agro-industrial complex*. Nalchik: Frigate; 2020. 476 p. (In Russ.). EDN: YCVURI.
2. Siptits S.O., Romanenko I.A., Evdokimova N.E. Model estimates of the impact of climate on the yield of grain and leguminous crops in the regions of Russia. *Forecasting Problems*. 2021;(2):75-86. (In Russ.). EDN: CXVXSU.
3. Zhemukhov R.Sh., Mashukova F.E. Anthropogenic climate change and its consequences for agriculture at the regional level. *Advances in Modern Natural Science*. 2016;(7):118-122. (In Russ.). EDN: ZDGVVX.
4. Libin I.Ya., Peres P., Oleinik T.L., Prudnikova R., Treiger E.M. Possible impact of global climate change on social processes and the economy of Russia. *International J. of Applied and Fundamental Research*. 2013;(9):105-108. (In Russ.). EDN: RBBKUP.
5. Available from: <https://www.diplomatie.gouv.fr/ru/politique-etrangere/climat/la-lutte-contre-le-changement-climatique/la-conference-de-paris-ou-cop21/> [Accessed 25th January 2025].
6. Santos F.D., Ferreira P.L., Pedersen J.S. The climate change challenge: a review of the barriers and solutions to deliver a Paris solution. *Climate*. 2022;10(5):75. EDN: RMMMPU. <https://doi.org/10.3390/cli10050075>
7. Zoidze E.K., Khomyakova T.C., Shostak Z.A., Sirotenko V.G., Ovcharenko L.E., Sukhareva V.A. On the problem of adequate agroclimatic support for the Russian economy in the context of climate change. *Meteorology and Hydrology*. 2010;(8):73-86. (In Russ.). EDN: NEKTNZ.
8. Bedritsky A.I., Korshunov A.A., Khandozhko L.A., Shaimardanov M.Z. Fundamentals of optimal adaptation of the Russian economy to hazardous weather and climate phenomena. *Meteorology and Hydrology*. 2009;(4):5-14. (In Russ.). EDN: KVKXLJ.
9. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Formation of a plan for adaptation of the regional agricultural sector to climate change: tasks and methods of solution. *Meteorology and Hydrology*. 2023;(10):57-65. (In Russ.). EDN: FYYVGO. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-10-57-65>
10. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Kupovykh G.V., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V., Ashabokova M.B. Method for reducing risks in agriculture associated with droughts, taking into account the probability of their occurrence. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Science*. 2023;(3):45-56. (In Russ.). EDN: AVDLEV. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-45-56>
11. Sukhovееva O.E. Adaptation of land use to climate change in Russia. *Meteorology and Hydrology*. 2020;(12):20-26. (In Russ.). EDN: XFMBOI.
12. Clements R., Hagggar J., Quezada A., Torres J. *Technologies for adaptation to climate change - Agriculture sector*. X. Zhu (Ed.). Roskilde: UNEP Centre in Risø; 2011. 219 p.
13. Galkin D. G. Directions for adaptation of agriculture to the consequences of global climate change. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2021;18(2):13-20. (In Russ.). EDN: FWAAYH. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2021-2-13-20>

14. *List of genera and species of agricultural plants, the production and cultivation of which is aimed at ensuring food security of the Russian Federation, varieties and hybrids of which are subject to inclusion in the State Register of Varieties and Hybrids of Agricultural Plants Approved for Use.* Order of the Government of the Russian Federation of 8th December 2022 No. 3835-R. Available from: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=455887&ysclid=mj2tdq9hu0737582479> [Accessed 11th May 2025]. (In Russ.).

15. Mesarovich M., Takahara Ya. *General theory of systems: mathematical foundations*. Moscow: World, 1978. 381 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Борис Азреталиевич Ашабоков – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков ВГИ; заведующий отделом математических методов исследования сложных систем и процессов ИИПРУ КБНЦ РАН.

Геннадий Владимирович Куповых – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических основ инженерного образования Института компьютерных технологий и информационной безопасности Инженерно-технологической академии ЮФУ.

Алла Амарбиевна Ташилова – доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник ВГИ.

Мариника Викторовна Барекова – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь ВГИ.

Лара Асировна Кешева – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ВГИ.

Наталья Вячеславовна Теунова – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ВГИ.

Information about the authors

Boris A. Ashabokov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Cloud Physics Department, HMGI; Head of Department of Mathematical Methods for Studying Complex Systems and Processes, IIRMP KBSC RAS.

Gennady V. Kupovykh – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Institute of Computer Technology and Information Security of Engineering and Technology Academy, SFedU.

Alla A. Tashilova – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher, HMGI.

Marinika V. Berekova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Scientific Secretary, HMGI.

Lara A. Kesheva – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, HMGI.

Natalia V. Teunova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, HMGI.

*Статья поступила в редакцию 01.08.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 01.08.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Научная статья

УДК 911.3 + 375 (571.1/.5)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-46-54>

РАЗВИТИЕ ОПОРНЫХ ГОРОДОВ ТРАНССИБИРСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО КОРИДОРА

**Николай Владимирович Воробьев^{1✉}, Александр Николаевич Воробьев²,
Нина Александровна Ипполитова³**

^{1, 2, 3} Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

³ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

¹ nikvly54@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0000-0001-6041-1491>, ResearcherID: AAZ-4512-2020, SPIN: 3821-1193

² Tore12@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5529-1384>, ResearcherID: G-6081-2018, SPIN: 8814-5431

³ Nina-ip@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2271-7390>, ResearcherID: AAB-2483-2020, SPIN: 3972-4178

Аннотация. Выявлены тенденции и особенности пространственного развития главных опорных городов Транссибирского экономического коридора. Изучены территории Сибирского федерального округа: Омской, Новосибирской, Кемеровской, Иркутской областей и Красноярского края. Рассматриваются главные опорные города (Новосибирск, Омск, Красноярск, Иркутск) в связи с муниципальными образованиями верхнего уровня, расположенными вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали. Исследование велось с применением статистического, картографического и сравнительно-географического методов. Массив социально-экономических и социально-демографических данных взят за период 2010–2025 гг. Основные данные использовались для изучения расселения, динамики населения, заработной платы, жилищного строительства, производственной деятельности. Исходя из статистических и картографических источников, в Транссибирском коридоре выделены несколько типов муниципальных образований: региональные центры, пригородные муниципалитеты (в пределах городских агломераций), периферийные муниципалитеты. Оценено взаимовлияние уровня развития, индустриальной специализации и концентрации производительных сил с динамикой населения и трансформацией систем расселения. Географические аспекты пространственного развития выражаются в усилении двух частично перекрывающихся градиентов концентрации населения и производства: магистрально-периферийного и центрально-периферийного. Особенно ярко выражены агломерационные эффекты на примере концентрации жилищного строительства в региональных центрах и их пригородных зонах. Дается представление о пространственном развитии наиболее заселенной, экономически диверсифицированной части Транссибирского экономического коридора. Территориальное расширение исследований позволит актуализировать географическую картину пространственного развития всего Транссибирского экономического коридора.

Ключевые слова: региональные центры, муниципалитеты, города, опорный каркас, концентрация, центрально-периферийный градиент, сибирские агломерации

Для цитирования: Воробьев Н.В., Воробьев А.Н., Ипполитова Н.А. Развитие опорных городов Транссибирского экономического коридора // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 46–54. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-2-46-54>

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ИГ СО РАН (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190019-9 и АААА-А21-121012190063-2).

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

Original article

DEVELOPMENT OF THE PIVOT CITIES OF THE TRANS-SIBERIAN ECONOMIC CORRIDOR

Nikolay V. Vorobyev^{1✉}, Alexander N. Vorobyev², Nina A. Ippolitova³

^{1, 2, 3} Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

³ Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

¹ nikvlv54@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0000-0001-6041-1491>, ResearcherID: AAZ-4512-2020, SPIN: 3821-1193

² Tore12@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5529-1384>, ResearcherID: G-6081-2018, SPIN: 8814-5431

³ Nina-ip@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2271-7390>, ResearcherID: AAB-2483-2020, SPIN: 3972-4178

Abstract. The aim of the study is to identify trends and features of the spatial development of the main pivot cities of the Trans-Siberian Economic Corridor. The study covers the territories of the Siberian Federal District of Omsk, Novosibirsk, Kemerovo, Krasnoyarsk Krai and Irkutsk. The authors consider the main pivot cities (Novosibirsk, Omsk, Krasnoyarsk, Irkutsk) in connection with the upper-level municipalities located along the Trans-Siberian Railway. The study was conducted using statistical, cartographic and comparative-geographical methods. The array of socio-economic and socio-demographic data is taken for the period 2010-2025. The main data were used to study the settlement, population dynamics, wages, housing construction, and industrial activity. Based on statistical and cartographic sources, several types of municipalities were identified in the Trans-Siberian Corridor: regional centers, suburban municipalities (within urban agglomerations), and peripheral municipalities. The mutual influence of the level of development, industrial specialization, and concentration of productive forces with population dynamics and the transformation of settlement systems was assessed. The geographical aspects of spatial development are expressed in the strengthening of two partially overlapping gradients of population and production concentration: main-peripheral and central-peripheral. Agglomeration effects are especially pronounced in the example of the concentration of housing construction in regional centers and their suburban areas. This study provides an idea of the spatial development of the most populated, economically diversified part of the Trans-Siberian Economic Corridor. Territorial expansion of the research will allow updating the geographical picture of the spatial development of the entire Trans-Siberian Economic Corridor.

Keywords: regional centers, municipalities, cities, framework, concentration, central-peripheral gradient, Siberian agglomerations

For citation: Vorobyev N.V., Vorobyev A.N., Ippolitova N.A. Development of the Pivot Cities of the Trans-Siberian Economic Corridor. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):46-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-46-54>

Acknowledgments: the publication was prepared within the framework of the implementation of the state assignment of the Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch, RAS (state registration number of the topic: AAAA-A21-121012190019-9 and AAAA-A21-121012190063-2).

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

Введение

Для такой обширной страны, как Россия, важным приоритетом пространственного развития является формирование сбалансированной системы расселения. Концепция опорного каркаса территориальной структуры существует более 40 лет [1]. В последние годы в связи со стратегией пространственного развития приобретает значение концепция опорных городов [2]. Определяющими выступают агломерационные эффекты, которые отражаются в виде концентрации производителей конечных товаров и услуг в крупнейших и крупных городах.

Уделяется внимание рассмотрению таких полосовидных линейно-узловых структур, как транспортные [3] и экономические коридоры [4]. Тематика экономических коридоров стала особенно активно разрабатываться в начале XXI в. [5, 6]. Наибольшее число исследований от-

носятся к азиатским регионам [7]. Для России в Евразии особое значение имеют направления Восток – Запад (реализованный путь в виде Транссиба) и Север – Юг (перспективный путь через Каспийский регион к Индийскому океану).

Комплексный анализ изучения основных факторов, влияющих на социально-экономическое развитие, представлен в ряде работ по изучению территорий, прилегающих к Транссибу [8], а также более обширных регионов. 11 сибирских субъектов Федерации рассматриваются как Транссибирский коридор «на разных территориальных уровнях (мезо – субъект РФ, локальном – город)» [9, с. 136]. Отдельно анализируются типы городов Транссиба [10].

Особое внимание уделяется «типологизации муниципальных образований на основе оценки основных особенностей системы расселения. Отличительными ее особенностями являются выделение в отдельную группу административных центров („столиц“) регионов, учет широкого круга городских агломераций ... детализированный учет плотности сельского населения» [11, с. 12]. Как новацию можно отметить выделение пригородных муниципалитетов по плотности населения.

Нами изучено социально-экономическое развитие муниципальных образований на нескольких территориальных полигонах: малые города [12], тенденции и проблемы трансформации городов Сибири [13], Байкало-Монгольский коридор [14], каркас населения и производства Байкальского региона [15]. Настоящее исследование, с одной стороны, базируется на опыте предыдущих, с другой – обращается к новому объекту, Транссибирскому экономическому коридору в СФО, в котором находятся наиболее развитые центры социально-экономического развития, в том числе три города-миллионника с их пригородными зонами.

Цель исследования заключается во взаимосвязанном изучении социально-демографического и социально-экономического развития опорных городов на фоне других муниципальных образований внутри Транссибирского экономического коридора в пределах Сибирского федерального округа. Последовательно анализируются и оцениваются процессы расселения, демографии, производственного развития, динамика зарплат, ввода жилья.

Объекты и методы

Полигон исследования – территория в границах цепочки муниципальных районов вдоль Транссибирской магистрали в пределах СФО (протяженностью 3170 км) – от западной границы Омской области до восточной границы Иркутской области. Территория имеет площадь 261 тыс. км² и население 7361 тыс. чел. на 2024 г. Средняя ширина примагистральной зоны достигает почти 80 км.

Основу исследования составили статистические материалы базы данных показателей муниципальных образований (БД ПМО) Федеральной службы государственной статистики [16]. За первичные единицы наблюдения в зоне Транссиба приняты городские округа (24), муниципальные округа (6) и муниципальные районы (40) Красноярского края, Иркутской, Кемеровской, Новосибирской, Омской областей (таблица).

Число муниципальных образований верхнего уровня в Транссибирском коридоре Сибирского федерального округа на 01.01.2024 [17] / Number of upper-level municipalities in the Trans-Siberian Corridor of the Siberian Federal District as of 01.01.2024 [17]

Муниципальные образования	Число муниципальных образований*					
	Омская обл.	Новосибирская обл.	Кемеровская обл.	Красноярский край	Иркутская обл.	Всего по 5 регионам СФО
Городские округа	1/1	4/5	3/15	8/17	8/10	24/48
Муниципальные округа	0/0	0/0	6/17	0/3	0/0	6/20
Муниципальные районы	5/32	11/30	0/1	12/41	12/32	40/134
Всего	6/33	15/35	9/33	20/61	20/42	70/202

* в числителе – муниципальные образования в рамках Транссибирского коридора, в знаменателе – муниципальные образования в регионе в целом.

Основные методы (статистический, картографический, сравнительно-географический) применяются на всех стадиях исследования. Используются экономико-географические методы анализа территориально-отраслевой структуры промышленности и социально-демографических показателей. Картографический метод позволил отобразить пространственные особенности размещения промышленности и населения и выявить основные диспропорции современного пространственного развития.

Результаты исследования

Транссибирский коридор – урбанизированная территория, в нем находятся 24 городских округа и все три города-миллионника (Новосибирск, Красноярск, Омск). Здесь проживают 64,9 %, а за его пределами – 35,1 % городского населения СФО. По сельскому населению соотношение почти обратное. На Транссибирский коридор приходится 39,2 % сельского населения, а за его пределами – 60,8 %.

Средняя плотность сельского населения в муниципальных образованиях верхнего уровня в Транссибирском коридоре составляет 5 чел/км², в 12 раз превышая среднюю плотность (0,4 чел/км²) на внемагистральных территориях и варьируя от 0 в 18 городских округах до 63,1 чел/км² в Новосибирском районе. В абсолютном большинстве муниципальных районов (52) плотность населения попадает в интервал 1–10 чел/км² (рис. 1).

В муниципальных образованиях верхнего уровня (городских округах и муниципальных районах) Транссибирского коридора она составляет 26,6 чел/км², превышая в 18 раз среднюю плотность на внемагистральных территориях (1,5 чел/км²). Крупнейшие города – административные центры регионов имеют плотность населения, превышающую 1000 чел/км², большинство городских округов – более 400 чел/км² (рис. 1). Плотность населения в городских округах – от 62,9 в Дивногорске до 3407,3 чел/км² в Красноярске. В большинстве муниципальных районов (38) плотность населения составляет менее 10 чел/км².

Динамика численности населения Транссибирского коридора в целом положительна: +3,9 % за 2010–2024 гг. По 5 рассматриваемым регионам СФО население за данный период уменьшилось на 2,6 %, но существенное снижение (–10,9 %) произошло за счет внетранссибирских территорий. Дифференциация 70 муниципалитетов по динамике населения показывает, что в 51 имеется убыль и только в 19 – прирост (рис. 2). По росту населения на фоне других транссибирских территорий выделяются 3 крупные агломерации (Новосибирская, Красноярская и Иркутская), которые растут вместе со своими городами-ядрами. В Омской агломерации, как и в самом Омске, население уменьшается. Все 8 районов, входящих в состав агломераций, имеют рост населения, что особенно проявляется в Иркутском (199,3 %) и Новосибирском (147,1 %) районах. Лидирующая роль Новосибирской агломерации проявляется в том, что все входящие в неё муниципальные образования имеют рост населения.

Рост объёмов отгруженной продукции в большинстве территорий обеспечен развитием добывающей промышленности, транспорта, сельского хозяйства. Снижение показателей в ряде муниципалитетов связано прежде всего с закрытием отдельных предприятий. Территории, где преобладают предприятия, обслуживающие железнодорожный транспорт, и развито сельское хозяйство, демонстрируют плавный рост за счет устойчивой работы основных производств.

Проведенная группировка муниципалитетов по объему отгруженной продукции товаров собственного производства, выполненных работ и услуг позволила выявить доминирование региональных центров и других городов.

Первая группа (продукции на более 500 млрд р.), представленная четырьмя региональными столицами – Новосибирск, Омск, Красноярск и Иркутск, составляет лишь 6 % от общего числа рассматриваемых территорий. Однако, несмотря на сравнительно небольшую численность, эти города демонстрируют заметные показатели по объему отгруженной продукции, что подчеркивает их экономическую значимость в рамках рассматриваемого региона. Они являются важными центрами Сибири с диверсифицированной структурой промышленности. Группа четырёх опорных городов представляет собой разнообразие в уровне экономического развития и специализации, эти города оказывают существенное влияние на экономику Сибири в целом.

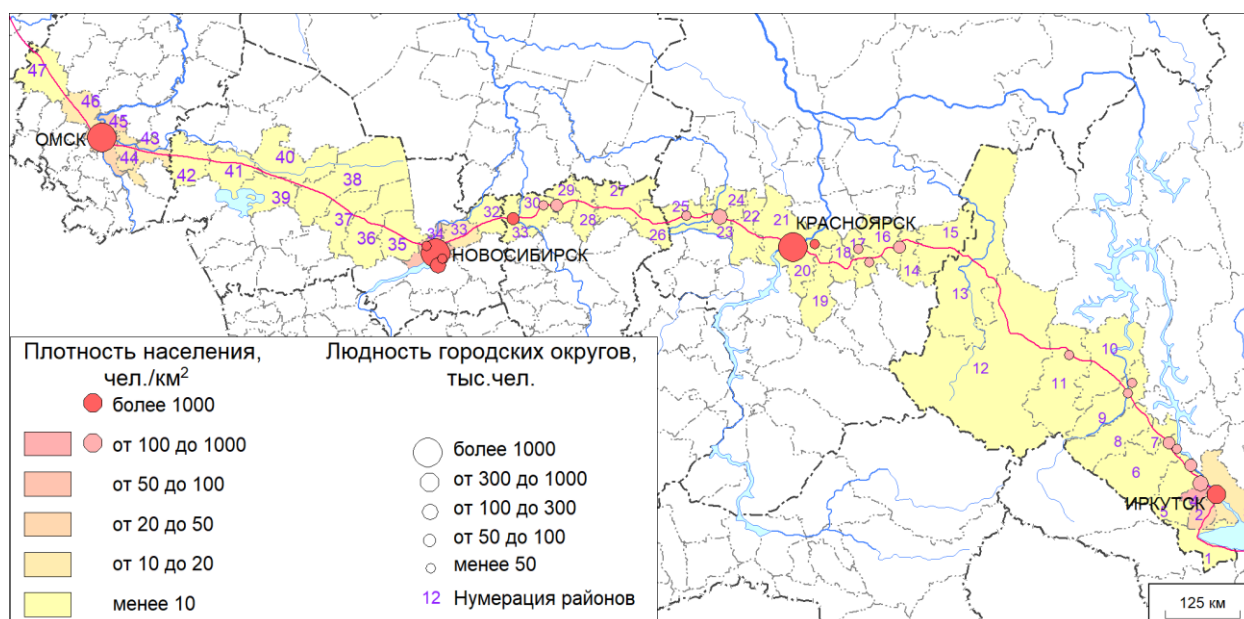


Рис. 1. Плотность населения городских округов и муниципальных районов Транссибирского экономического коридора в 2024 г.: 1 – Слюдянский; 2 – Шелеховский; 3 – Иркутский; 4 – Ангарский; 5 – Усольский; 6 – Черемховский; 7 – Аларский; 8 – Заларинский; 9 – Зиминский; 10 – Куйтунский; 11 – Тулунский; 12 – Нижнеудинский; 13 – Тайшетский; 14 – Нижнеингашский; 15 – Иланский; 16 – Канский; 17 – Рыбинский; 18 – Уярский; 19 – Манский; 20 – Березовский; 21 – Емельяновский; 22 – Козульский; 23 – Ачинский; 24 – Большеулуйский; 25 – Боготольский; 26 – Тяжинский; 27 – Мариинский; 28 – Ижморский; 29 – Яйский; 30 – Яшкинский; 31 – Юргинский; 32 – Болотнинский; 33 – Мошковский; 34 – Новосибирский; 35 – Коченевский; 36 – Чулымский; 37 – Каргатский; 38 – Убинский; 39 – Барабинский; 40 – Куйбышевский; 41 – Чановский; 42 – Татарский; 43 – Калачинский; 44 – Кормиловский; 45 – Омский; 46 – Любинский; 47 – Называевский / Fig. 1. Population density of urban districts and municipal areas of the Trans-Siberian Economic Corridor in 2024. District numbering: 1 - Slyudyansky; 2 - Shelekhovsky; 3 - Irkutsky; 4 - Angarsky; 5 - Usolsky; 6 - Cheremkhovsky; 7 - Alarsky; 8 - Zalarinsky; 9 - Ziminsky; 10 - Kuytunsky; 11 - Tulunsky; 12 - Nizhneudinsky; 13 - Taishetsky; 14 - Nizhneingashsky; 15 - Ilansky; 16 - Kansky; 17 - Rybinsky; 18 - Uyarsky; 19 - Mansky; 20 - Berezovsky; 21 - Yemelyanovsky; 22 - Kozulsky; 23 - Achinsky; 24 - Bolsheuluysky; 25 - Bogotolsky; 26 - Tyazhinsky; 27 - Mariinsky; 28 - Izhmorsky; 29 - Yaisky; 30 - Yashkinsky; 31 - Yurginsky; 32 - Bolotninsky; 33 - Moshkovsky; 34 - Novosibirsk; 35 - Kochenevsky; 36 - Chulymsky; 37 - Kargatsky; 38 - Ubinsky; 39 - Barabinsky; 40 - Kuibyshevsky; 41 - Chanovsky; 42 - Tatarsky; 43 - Kalachinsky; 44 - Kormilovsky; 45 - Omsky; 46 - Lyubinsky; 47 - Nazayevsky



Рис. 2. Миграционные изменения населения Транссибирского экономического коридора в 2010–2024 гг. / Fig. 2. Migration changes in the population of the Trans-Siberian Economic Corridor in 2010-2024

Вторая группа из 5 городов и 2 районов, составляющая 10 % от общего числа рассматриваемых муниципалитетов всех регионов (кроме Омской области), имеет большое значение благодаря имеющемуся разнообразию отраслей. Таким образом, эта группа представляет собой сочетание территорий с развитой промышленной и энергетической базой и территорий, играющих вспомогательную роль в развитии крупнейших сибирских агломераций.

Третья группа из 7 городов и 12 районов составляет $\frac{1}{4}$ всех муниципалитетов. Эти территории разнообразны по своему экономическому профилю и отраслевой специализации, что обуславливает их значимость для региональной экономики. Среди административных единиц можно выделить моногорода, ориентированные на одну ключевую отрасль, многопрофильные города и районы с доминирующей отраслью, а также города и районы с разнообразной отраслевой структурой.

Четвертая группа из 7 городов и 20 районов занимает значительную часть (40 %) всех муниципалитетов. Одна подгруппа – с промышленной специализацией (добывающая промышленность, металлургия, химия и другие отрасли). Вторая включает территории, специализирующиеся на переработке сельскохозяйственного сырья.

Пятая группа (продукции на менее 1 млрд р.) включает 6 муниципальных районов, где преобладает переработка сельскохозяйственного сырья (зерно, мясо, молоко и другие продукты), эти районы ориентированы на локальные рынки.

Шестая группа включает территории, по которым статистические данные отсутствуют, – это 6 районов Кемеровской области и г. Зеленогорск Красноярского края.

В рамках проведённого исследования осуществлён анализ ввода в действие жилья – одного из важнейших индикаторов социально-экономического благополучия территории. Группировка муниципальных образований по объёмам введённого жилья подтверждает тезис о ключевой роли административных столиц и прилегающих к ним районов, которые занимают лидирующие позиции по данному показателю. Наиболее низкие значения зафиксированы в малых городах и муниципалитетах с сельскохозяйственной специализацией, где экономическая активность ограничена, а инвестиционная привлекательность невысока.

Первая группа (ввод жилья от 100 до 1300 тыс. кв м) характеризуется высоким уровнем жилищного строительства, что объясняется урбанизацией (региональные центры), развитыми строительными мощностями, притоком населения и активным развитием пригородной зоны (районы). Группа представлена четырьмя парами город – пригородный район: Новосибирск и Новосибирский район, Омск и Омский район, Красноярск и Емельяновский район, Иркутск и Иркутский район.

Вторая группа (ввод жилья 10–100 тыс. кв. м) – 16 территорий со стабильной, но ограниченной экономической базой, а также отсутствием крупных застройщиков и инвесторов вследствие незначительного спроса из-за невысокой платежеспособности населения. В группу входят, например, от Новосибирской области исключительно территории, входящие в Новосибирскую агломерацию: Бердск, Кольцово, Обь и Мошковский район.

Для **третьей** (ввод жилья 1–10 тыс. кв. м), самой многочисленной (32 муниципалитета) группы характерен низкий уровень ввода жилья, что объясняется сочетанием таких факторов, как низкая динамика экономического роста, ограниченный спрос на новое жилье, низкая покупательная способность и отсутствие крупных застройщиков.

В **четвертой группе** (ввод жилья менее 1 тыс. кв. м) из 6 территорий отмечается ограниченная строительная активность в совокупности со снижением численности населения.

При проведении исследования использован показатель уровня заработной платы, который является комплексным индикатором, отражающим не только экономическое состояние региона, но и уровень жизни, социальной справедливости и устойчивого развития. На основании статистических данных проявляется дифференциация муниципалитетов в зависимости от уровня заработной платы и ее динамики (рис. 3). Наиболее высокие размеры средней заработной платы и положительная динамика роста наблюдаются в столичных городах – Иркутск, Красноярск, Новосибирск – крупнейших экономических, административных и научно-образовательных центрах, а также на научно-производственных территориях – Кольцово (биотехнологии и наука), Обь (близость к Новосибирску).

тыс. руб.

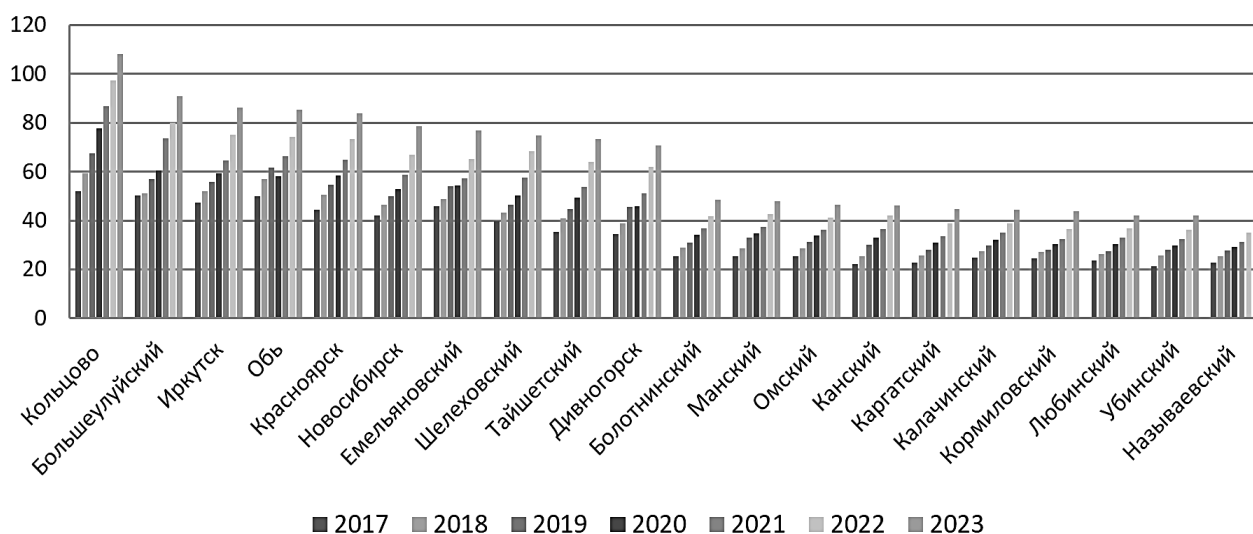


Рис. 3. Динамика заработной платы в экономическом коридоре (10 муниципалитетов-лидеров и 10 муниципалитетов-аутсайдеров) / Fig. 3. Dynamics of wages in the economic corridor (10 leader municipalities and 10 outsider municipalities)

Ведущие позиции отмечаются в промышленных районах – Шелеховский и Тайшетский (алюминиевая промышленность), Большеулуйский (Ачинский нефтеперерабатывающий завод), а также муниципалитетах с выгодным географическим положением – Емельяновский (рядом с Красноярском), где развиваются логистика и строительство.

Низкий уровень оплаты труда зафиксирован в районах с моноотраслевой экономикой, сельскохозяйственной специализацией или слабой инфраструктурой в преимущественно аграрных и удалённых районах (Болотнинский, Манский, Каргатский, Любинский, Убинский и др.).

Заключение

Ключевым фактором, формирующим социально-экономическую динамику регионов, выступает наличие крупных городов. Именно региональные центры совместно с пригородными территориями становятся лидерами по темпу жилищного строительства, уровню заработной платы и демонстрируют устойчивое развитие промышленного сектора.

В условиях растущей концентрации населения, производственных мощностей, жилищного строительства и многообразия экономической деятельности наибольшее развитие наблюдается в крупных агломерациях, которые сформировались вдоль Транссибирского экономического коридора. В них преобладают социально-экономические эффекты, связанные с концентрацией ресурсов, что значительно превышает влияние транзитных магистралей, распределённых по территории. На текущий момент крупные города выступают в качестве опорных центров хозяйственной и расселенческой систем. Расширение исследования на западные и восточные регионы Транссибирского экономического коридора будет способствовать более точной оценке роста транзитного потенциала магистралей, а также выявлению территориально-структурных изменений, уточняя роль данного коридора в пространственном развитии сибирских и дальневосточных регионов, что станет основой для дальнейшего территориального планирования и развития.

Список источников

1. Ланно Г.М. Концепция опорного каркаса территориальной структуры народного хозяйства: развитие, теоретическое и практическое значение // Изв. АН СССР. Сер. Геогр. 1983. № 5. С. 16–28. EDN: JDSFWA.
2. Маркварт Э., Киселева Н.Н., Соснин Д.П. Система опорных населенных пунктов как механизм управления пространственным развитием: теоретические и практические аспекты // Власть. 2022. Т. 30, № 2. С. 95–111. EDN: UNFDYM. <https://doi.org/10.31171/vlast.v30i2.8939>

3. Вардомский Л.Б., Тураева М.О. Развитие транспортных коридоров постсоветского пространства в условиях современных геополитических и экономических вызовов: науч. докл. М.: Ин-т экономики РАН, 2018. 64 с. EDN: YSAJPV.

4. Намжилова В.О. Экономические коридоры на евразийском пространстве: инициативы Китая и мировой опыт // Россия и АТР. 2018. № 1. С. 65–81. EDN: YWJEZN. <https://doi.org/10.24411/1026-8804-2018-00004>

5. Brunner H.-P. What is Economic Corridor Development and What Can It Achieve in Asia's Subregions? // ADB Working Paper Series on Regional Economic Integration. Manila: Asian Development Bank (ADB), 2013. № 117. 53 p. URL: <https://hdl.handle.net/11540/2308> (дата обращения: 23.05.2025).

6. Roberts M., Melecky M., Bougna Th., Xu Y. Transport Corridors and Their Wider Economic Benefits: A Critical Review of the Literature. World Bank, 2018. 56 p. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-8302>

7. Thame C. The Economic Corridors Paradigm as Extractivism: Four Theses for a Historical Materialist Framework // Review of International Studies. 2021. Vol. 47, iss. 4. P. 549–569. EDN: SZXZOQ. <https://doi.org/10.1017/s0260210521000292>

8. Зона Транссиба как евразийский экономический коридор / отв. ред. Л.М. Корытный. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. 251 с. EDN: LPNANO.

9. Заборцева Т.И., Игнатова О.А., Розов П.В. Социально-экономическое развитие территорий Транссибирского коридора в XXI веке // География и природные ресурсы. 2024. № 5. С. 134–142. EDN: HDHCВH. <https://doi.org/10.15372/GIPR20240516>

10. Миронова М.Н., Кузнецова Н.Г., Шолудько А.Н. Типы городов Транссибирской магистрали России: динамика численности населения и промышленных функций // Вестн. РУДН. Серия: Экономика. 2017. Т. 25, № 4. С. 553–565. EDN: YTYAYZ. <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2017-25-4-553-565>

11. Кузнецова О.В. Муниципальные образования России: новые подходы к типологизации и оценке социально-экономической ситуации // Регион. исследования. 2024. № 3 (83). С. 4–15. EDN: OTDVOT. <https://doi.org/0.5922/1994-5280-2024-3-1>

12. Ипполитова Н. А. Пространственная динамика численности населения малых городов сибирских регионов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 1 (217). С. 70–78. EDN: AGRQAS. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-70-78>

13. Сибирские города: тенденции и проблемы постсоветской трансформации / отв. ред. Н.В. Воробьев. Новосибирск: СО РАН, 2024. 198 с. EDN: NFPZXX. <https://doi.org/10.53954/9785605099535>

14. Воробьев Н.В., Воробьев А.Н., Ипполитова Н.А. Байкало-Монгольский транспортный коридор: взаимосвязь производства и населения // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 3. С. 42–50. EDN: XCMAYR. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-3-42-50>

15. Воробьев Н.В., Воробьев А.Н., Ипполитова Н.А. Опорный каркас населения и производства Байкальского региона в пределах Транссибирского транспортного коридора // Геогр. вестн. 2025. № 1 (72). С. 50–61. EDN: YXIGFS. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2025-1-50-61>

16. База данных показателей муниципальных образований. URL: <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst> (дата обращения: 17.04.2025).

17. Численность населения Российской Федерации на 1 января 2024 г.: стат. сб. М.: Фед. служба гос. статистики, 2024.

References

1. Lappo G.M. The concept of the supporting framework of the territorial structure of the national economy: development, theoretical and practical significance. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Series: Geography*. 1983;(5):16-28. (In Russ.). EDN: JDSFWA.

2. Markvart E., Kiseleva N.N., Sosnin D.P. The system of supporting settlements as a mechanism for managing spatial development: theoretical and practical aspects. *Power*. 2022;30(2):95-111. (In Russ.). EDN: UNFDYM. <https://doi.org/10.31171/vlast.v30i2.8939>

3. Vardomskiy L.B., Turaeva M.O. *Development of transport corridors of the post-Soviet space in the context of modern geopolitical and economic challenges*. Scientific report. Moscow: Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences Press; 2018. 64 p. (In Russ.). EDN: YSAJPV.

4. Namzhilova V.O. Economic corridors in the Eurasian space: China's initiatives and global experience. *Russia and Asia Pacific*. 2018;(1):65-81. (In Russ.). EDN: YWJEZN. <https://doi.org/10.24411/1026-8804-2018-00004>

5. Brunner H.-P. What is economic corridor development and what can it achieve in Asia's subregions? *ADB Working Paper Series on Regional Economic Integration*. Manila: Asian Development Bank (ADB); 2013. No. 117. 53 p. Available from: <https://hdl.handle.net/11540/2308> [Accessed 23rd May 2025].

6. Roberts M., Melecky M., Bougna Th., Xu Y. *Transport Corridors and Their Wider Economic Benefits: A Critical Review of the Literature*. World Bank; 2018. 56 p. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-8302>

7. Thame C. The Economic Corridors Paradigm as Extractivism: Four Theses for a Historical Materialist Framework. *Review of International Studies*. 2021;47(4):549-569. EDN: SZXZOQ. <https://doi.org/10.1017/s0260210521000292>
8. Korytny L.M., ed. *Trans-Siberian Railway zone as a Eurasian economic corridor*. Irkutsk: Publishing House of the Sochava Institute of Geography SB RAS; 2016. 251 p. (In Russ.). EDN: LPNANO.
9. Zabortseva T.I., Ignatova O.A., Rogov P.V. Socio-economic development of the territories of the Trans-Siberian corridor in the 21st century. *Geography and Natural Resources*. 2024;(5):134-142. (In Russ.). EDN: HDHCBH. <https://doi.org/10.15372/GIPR20240516>
10. Mironova M.N., Kuznetsova N.G., Sholudko A.N. Types of Cities on the Trans-Siberian Railway of Russia: Population Dynamics and Industrial Functions. *Bulletin of RUDN University. Series: Economics*. 2017;25(4):553-565. (In Russ.). EDN: YTYAYZ. <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2017-25-4-553-565>
11. Kuznetsova O.V. Municipalities of Russia: New Approaches to Typology and Assessment of the Socio-economic Situation. *Regional Studies*. 2024;(3):4-15. (In Russ.). EDN: OTDVOT. <https://doi.org/0.5922/1994-5280-2024-3-1>
12. Ippolitova N.A. Spatial dynamics of the population of small towns in Siberian regions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Science*. 2023;(1):70-78. (In Russ.). EDN: AGRQAS. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-1-70-78>
13. Vorobyev N.V., ed. *Siberian cities: trends and problems of post-Soviet transformation*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2024. 198 p. (In Russ.). EDN: NFPZXX. <https://doi.org/10.53954/9785605099535>
14. Vorobyev N.V., Vorobyev A.N., Ippolitova N.A. Baikal-Mongolian transport corridor: the relationship between production and population. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Science*. 2021;(3):42-50. (In Russ.). EDN: XCMAYR. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-3-42-50>
15. Vorobyev N.V., Vorobyev A.N., Ippolitova N.A. The population and production framework in the Baikal region within the Trans-Siberian transport corridor. *Geographical Bulletin*. 2025;(1):50-61. (In Russ.). EDN: YXIGFS. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2025-1-50-61>
16. *Database of indicators of municipalities*. Available from: <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst> [Accessed 17th April 2025]. (In Russ.).
17. *Population of the Russian Federation as of January 1, 2024*: stat. collection. Moscow: Federal State Statistics Service Press; 2024. (In Russ.).

Информация об авторах

Н.В. Воробьев – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории экономической и социальной географии ИГ СО РАН.

А.Н. Воробьев – кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории картографии, геоинформатики и дистанционных методов ИГ СО РАН.

Н.А. Ипполитова – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории экономической и социальной географии ИГ СО РАН; доцент кафедры географии, безопасности жизнедеятельности и методики Педагогического института ИГУ.

Information about the authors

N.V. Vorobyev – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Economic and Social Geography, SIG SB RAS.

A.N. Vorobyev – Candidate of Science (Geography), Senior Researcher of the Laboratory of Cartography, Geoinformatics and Remote Sensing Methods, SIG SB RAS.

N.A. Ippolitova – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Economic and Social Geography, SIG SB RAS; Associate Professor of the Department of Geography, Life Safety and Methodology, Pedagogical Institute, ISU.

*Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 11.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 11.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Научная статья

УДК 528.88

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-55-62>

ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ ОТКРЫТЫХ ПЕСКОВ НА ВОСТОКЕ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ В 2022–2024 ГОДЫ

Валерия Витальевна Дорошенко¹, Иван Александрович Болгов²

^{1, 2} Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук, Волгоград, Россия

¹dor.valerya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3253-1132>

²bolgov-ia@yafanc.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3174-6382>

Аннотация. За исследуемый период (2022–2024 гг.) выявлена значительная динамика сокращения площадей открытых песков (в 3 раза). Картографирование открытых песков на востоке Ставропольского края (Нефтекумский, Левокумский районы, западная часть Терско-Кумского междуречья) для последующего геоинформационного анализа производилось методом визуального дешифрирования спутниковых снимков Sentinel-2 за август каждого года. При благоприятных климатических условиях (количество осадков, пыльные бури) массивы открытых песков заросли преимущественно однолетниками. При ухудшении климатических условий продолжилось сокращение площадей крупных массивов, но исчезла растительность на мелких очагах.

Ключевые слова: Ставропольский край, геоинформационный анализ, картографирование, опустынивание, пыльные бури, ГИС-технологии, дистанционное зондирование

Для цитирования: Дорошенко В.В., Болгов И.А. Динамика площади открытых песков на востоке Ставропольского края в 2022–2024 годы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 55–62. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-55-62>

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФНЦ агроэкологии РАН НИР FNFE-2024-0009 «Опустынивание территорий аридных, субаридных и сухих субгумидных регионов, картографирование современного состояния и динамики опустынивания земель, моделирование и прогнозирование процессов опустынивания, для планирования восстановления деградированных земель с применением геоинформационных технологий и аэрокосмических методов в условиях усиливающихся засух, песчаных и пыльных бурь».

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

Original article

DYNAMICS OF THE AREA OF OPEN SANDS IN THE EAST OF THE STAVROPOL REGION IN 2022-2024

Valeriya V. Doroshenko¹, Ivan A. Bolgov²

^{1, 2} Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation,
Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

¹dor.valerya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3253-1132>

²bolgov-ia@yafanc.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3174-6382>

© Дорошенко В.В., Болгов И.А., 2025

Abstract. During the study period (2022-2024), a significant dynamics of the areas of open sands was revealed (a 3-fold reduction). The mapping of open sands in the east of the Stavropol Region (Neftekumsky, Leovkumsky districts, the western part of the Tersko-Kuma interfluve) for subsequent geoinformation analysis was carried out by visual decoding of Sentinel-2 satellite images for August of each year. Under favorable climatic conditions (precipitation, dust storms), the open sand massifs are overgrown mainly with annuals. With the deterioration of climatic conditions, the areas of large areas continued to decrease, but vegetation on small foci disappeared.

Keywords: Stavropol Region, geoinformation analysis, mapping, desertification, dust storms, GIS technologies, remote sensing

For citation: Doroshenko V.V., Bolgov I.A. Dynamics of the Area of Open Sands in the East of the Stavropol Region in 2022-2024. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):55-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-55-62>

Acknowledgments: this work was completed as part of the state assignment of the Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences, research project FNFE-2024-0009, "Desertification of arid, subarid, and dry subhumid regions, mapping the current state and dynamics of desertification, modeling and forecasting desertification processes, for planning the restoration of degraded lands using geoinformation technologies and aerospace methods in conditions of increasing droughts, sandstorms, and dust storms."

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

Терско-Кумское междуречье, располагающееся на территории Прикаспийской низменности, в течение столетий использовалось для выпаса мелкого рогатого скота, но в последние годы состояние пастбищ резко ухудшилось под воздействием комплекса антропогенных и природных факторов, главные из которых – засухи, активный ветровой режим и пастбищная дигрессия растительного покрова [1, 2]. Наименее изученным участком Терско-Кумского междуречья является его западная часть – узкий участок, протянувшийся с севера на юг вдоль восточной границы Ставропольского края (Левокумский, Нefтекумский, Курский, Степновский районы), поскольку исследования процессов опустынивания, проводившиеся в данном регионе с середины XX в., в большинстве случаев ограничивались территорией Дагестана и Чечни [3–5]. Сохранявшаяся в течение многих лет повышенная нагрузка на пастбища привела к сокращению видового разнообразия и развитию семенного опустынивания, проявляющегося в снижении доли или исчезновении кормовых, многолетних трав, а плоский рельеф местности прилегающих территорий не создает значительных препятствий для перемещения воздушных масс, что усугубляет степень дефляционного воздействия на легкие почвы востока Ставропольского края и приводит к значительному росту площадей открытых песков [1, 6]. Восток Ставрополя представляет собой разнообразную по почвенным и гидрологическим условиям территорию – засоленность почв и грунтовых вод резко возрастает с юга на север (минерализация грунтовых вод достигает 70 г/л), в связи с чем видовое разнообразие растительности сильно ограничено [7, 8].

Особенностью применения данных спутниковой съемки для выявления и картографирования массивов открытых песков является возможность определения только видимой площади песков – участков, не покрытых растительностью [9, 10]. Как обширные и протяженные в пространстве объекты, пастбища – один из наиболее подходящих типов угодий для дистанционных наблюдений, в том числе по спутниковым материалам среднего разрешения [11, 12]. При этом опыт многолетнего мониторинга процессов опустынивания на основе дистанционных методов показывает, что видимая площадь открытых песков может значительно изменяться от месяца к месяцу в зависимости от количества осадков и ветровой нагрузки. Так, существенное отличие 2023 г. по сумме осадков и ветровой нагрузке от засушливого 2022 г. (с большим количеством интенсивных и продолжительных пыльных бурь) привело к сокращению видимой площади открытых песков в 3 раза за счет зарастания массивов рудеральной растительностью, преимущественно однолетниками [6, 9, 13].

Цель настоящего исследования – выявление динамики площадей открытых песков в зависимости от количества осадков летнего периода в восточных районах Ставропольского края на основе дешифрирования данных спутниковой съемки.

Методы исследования

Для дешифрирования массивов открытых песков применялись безоблачные спутниковые снимки Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м) в комбинации каналов «естественные цвета» (красный, зеленый, синий спектральные каналы) за август 2022, 2023, 2024 гг. и прямые дешифровочные признаки (цвет, текстура, форма) [5, 6]. Поскольку абсолютное большинство песчаных массивов на территории исследования сформировалось в результате эолового воздействия, они имеют характерную конфигурацию, вытянутую в направлении преобладающих восточных ветров [6]. Также использовались полученные предварительно данные о пространственном положении соровых понижений и солончаков, основанные на визуальном дешифрировании спутниковых снимков с корректировкой полученных результатов относительно маски открытых песков, имеющих схожие спектральные характеристики, и цифровой модели рельефа SRTM-1, позволяющей определить понижения относительно окружающей местности [7]. Использовался метод визуального дешифрирования, так как различные подходы автоматизированного анализа изображений требуют трудоемкой фильтрации результатов и при дифференциации соровых понижений, солончаков и открытых песков, и при выявлении заросших песчаных участков [7, 9].

Так как на юге исследуемой территории динамика площадей открытых песков незначительна в связи с более благоприятными лесорастительными условиями и большим объемом лесомелиоративных работ, проведенных в 80-е гг. XX в., данная работа касается северной части (Левокумский, Нефтекумский районы) с наибольшей концентрацией засоленных участков и массивов подвижных песков [3, 6, 7].

Источником метеорологических данных стал сервис «Погода и климат» (<http://www.pogodaiklimat.ru/>) для ближайшей метеостанции в г. Южно-Сухокумске (Ногайский район Республики Дагестан, 10 км к востоку от границы исследуемой территории).

Данные о видовом составе растительности на песках получены в результате полевых исследований в 2022 и 2023 гг., также проведена полевая верификация результатов камерального визуального дешифрирования – точность определения объектов, в том числе дифференциации открытых песков и соровых понижений, превысила 98 %. Полевые исследования с целью верификации результатов дешифрирования в 2022 г. проходили на участках с наиболее разнообразными условиями: не менее одного участка на открытых песках, песках с различной степенью зарастания и заросших песках, на соровых понижениях и засыпанных песком соровых понижениях (всего 17). В 2023 г. полевые исследования включали участки 2022 г. и дополнительные участки в местах наибольшей выявленной динамики (всего 21).

Обработка растровых материалов спутниковой съемки и их дешифрирование, а также формирование картографических материалов осуществлялись в программной среде ГИС QGIS 3, статистическая обработка полученных данных проводилась в среде MS Excel.

Результаты исследования

За исследуемый период картографировано более 3 тыс. объектов общей площадью более 68 тыс. га. Наибольшие площади отмечены в 2022 г. (53,3 тыс. га), когда было зарегистрировано множество пыльных бурь на фоне малого количества осадков в течение года (рис. 1) и предшествующих лет с постоянным возрастанием площадей и количества песчаных массивов [6, 13]. Наименьшие площади зафиксированы в 2023 г., когда не было ни одной пыльной бури по данным метеостанций прилегающих территорий, а годовая сумма осадков превысила 300 мм (235 мм в течение вегетационного периода), причем большинство дней, когда скорость ветра достигала дефляционно-опасной отметки, были дождливыми, т.е. возможность дефляции практически отсутствовала [9]. Таким образом, сочетание климатических условий в 2023 г. было благоприятным для роста растительности, в связи с чем видимая площадь открытых песков резко сократилась из-за зарастания массивов однолетниками, семена которых, вероятно, были принесены ветром вместе с минеральным материалом, – солянкой сорной (*Salsola tragus* L.), верблюжьей колючкой (*Alhagi pseudalhagi* M. Bieb.), кумарчиком песчаным (*Corispermum pungens* Vahl). Разрастание подобных видов не может приравниваться к полноценному возобновлению степных фитоценозов из-за их отмирания и низкой пастбищной ценности [14].

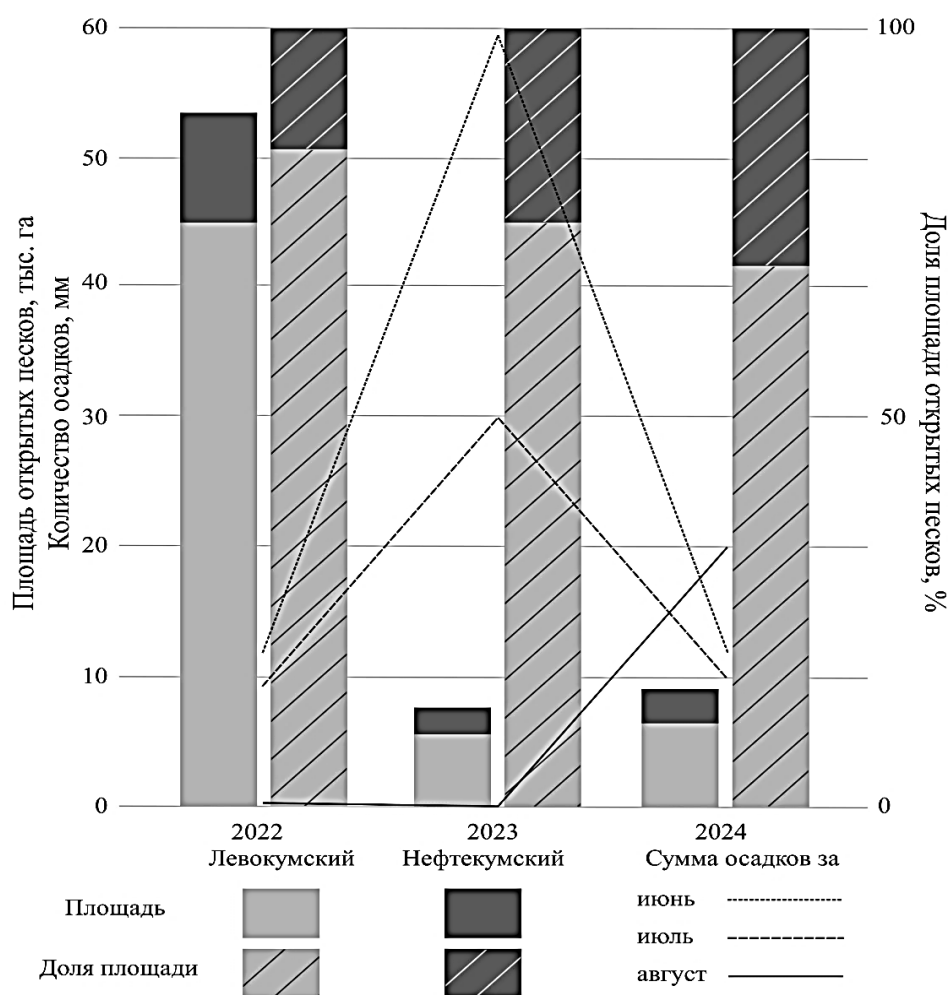


Рис. 1. График площадей открытых песков и количества осадков за исследуемый период
 / Fig. 1. Graph of open sand areas and precipitation over the study period

Большое значение при оценке динамики площадей открытых песков имеет повторяемость их выявления, которая позволяет судить о зарастании или формировании массивов (рис. 2), а также средняя площадь объекта, которая за три года сократилась со 135 до 4 га.

Несмотря на то что площадь крупных массивов продолжает снижаться, что хорошо заметно на крупномасштабных схемах (рис. 3, 4), возрастание общей площади связано с отмиранием растительности на мелких очагах. При дальнейшем эоловом воздействии такие участки могут стать котловинами выдувания и привести к формированию новых крупных массивов открытых песков.

При этом необходимо отметить, что последствием семенного опустынивания и многолетнего перевыпаса является существенное сокращение видового разнообразия на территории исследования с повышением доли ядовитых и колючих видов (молочай Сегиерова (*Euphorbia seguieriana* Neck.), паслен рогатый (*Solanum rostratum* Dunal), гелиотроп (*Heliotropium europaeum* L.)), тогда как ценные в пастбищном отношении виды (ковыли, мятлики) быстро выедаются скотом и не успевают сбросить семена из-за своего незначительного количества [1, 15]. Для возобновления разнообразия пастбищных фитоценозов необходим подсев и посев ценных трав, а также регулирование пастбищной нагрузки [14].

Заключение

В результате колебаний климатических условий в течение трехлетнего периода на востоке Ставропольского края наблюдается значительная динамика площади открытых песков. На фоне увеличения количества осадков отмечается резкое снижение площади открытых песков в 2023 г. по сравнению с 2022 г., но в 2024 г., несмотря на сокращение площадей отдельных крупных массивов открытых песков, общая площадь возросла.

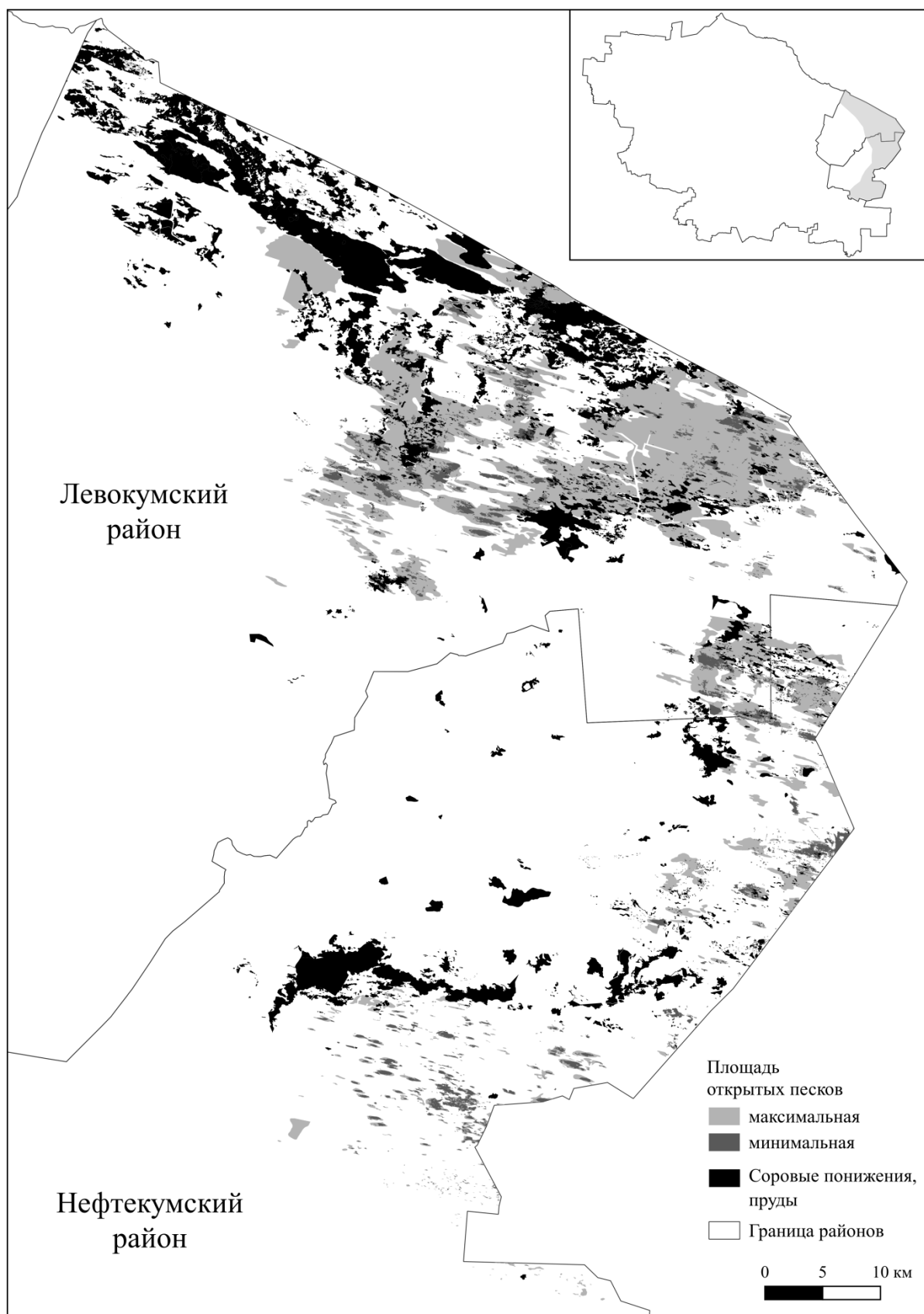


Рис. 2. Схема взаимного пространственного положения максимальных и минимальных площадей открытых песков / Fig. 2. The scheme of the relative spatial position of the maximum and minimum areas of open sands

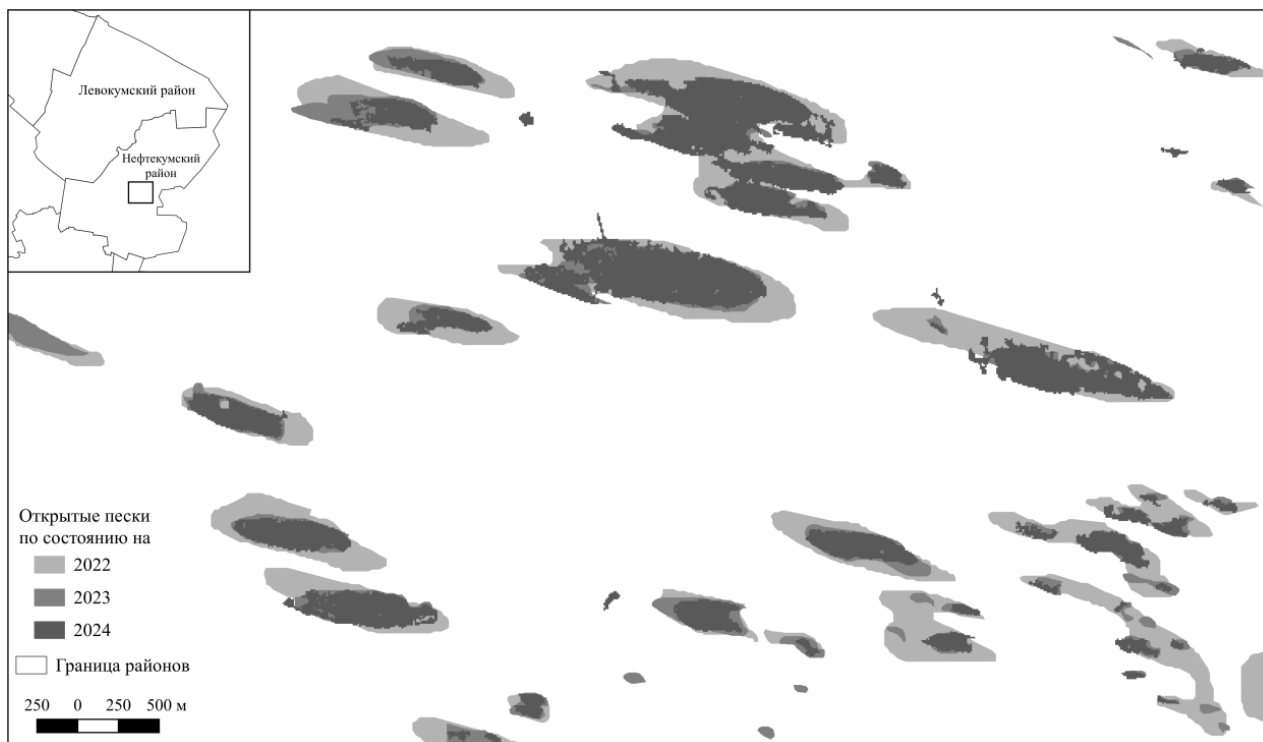


Рис. 3. Схема пространственного положения открытых песков в Нефтекумском районе
/ Fig. 3. The scheme of the spatial position of open sands in the Neftekumsky district

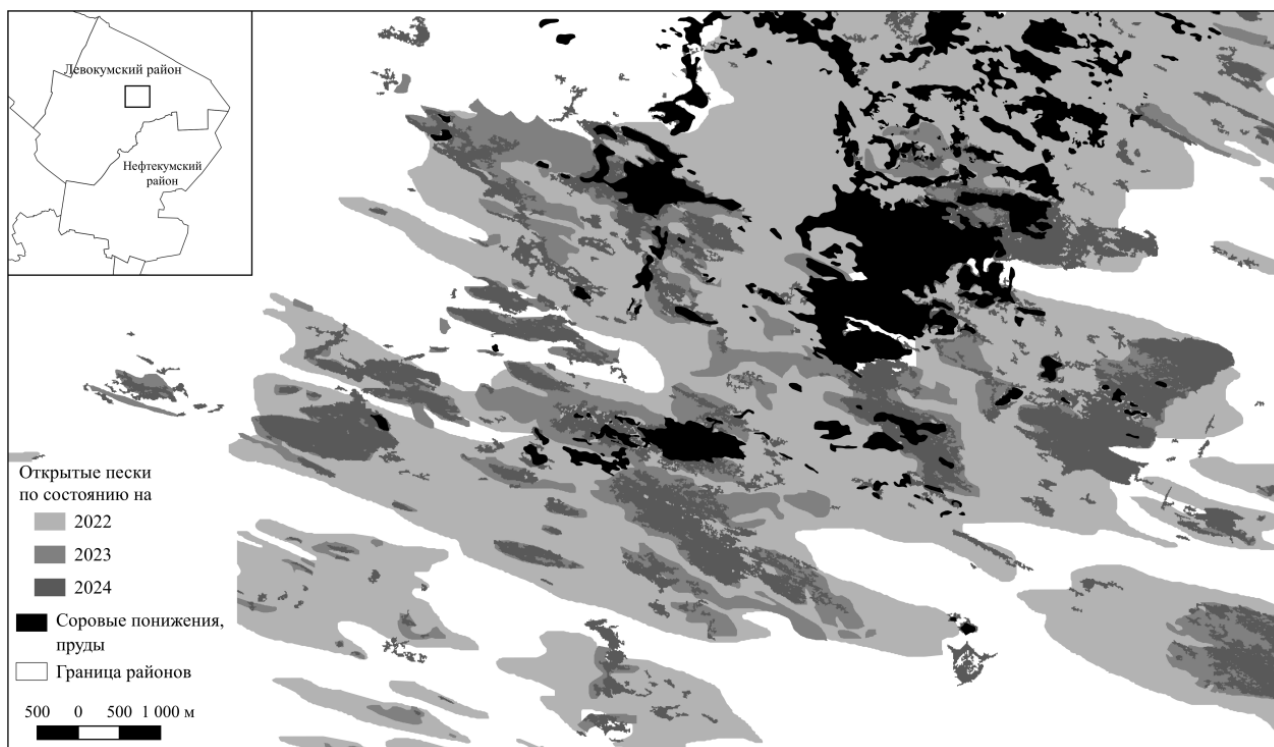


Рис. 4. Схема пространственного положения открытых песков в Левкумском районе
/ Fig. 4. The scheme of the spatial position of open sands in the Levokumsky district

Применение методов камеральной обработки данных спутниковой съемки и геоинформационного анализа позволяет сократить затраты времени на обеспечение постоянного мониторинга и сопоставление полученных разновременных результатов.

На основе полученных данных о динамике открытых песков в соответствии с установленными рекомендациями по лесо- и фитомелиорации может быть сформирован комплекс мероприятий и ассортимент растений-мелиорантов для создания пастбищных угодий на песках и повышения продуктивности подвергшихся деградации пастбищ.

Список источников

1. Лапенко Н.Г., Хонина О.В. Оценка пастбищной дигрессии степных экосистем аридной зоны Ставрополя // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36, № 5. С. 16–20. EDN: NOICIN. https://10.53859/02352451_2022_36_5_16
2. Юферев В.Г., Беляев А.И., Синельникова К.П. Опустынивание земель сельскохозяйственного назначения в Черноземельском районе Калмыкии // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 4(68). С. 465–473. EDN: LAEWWU. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-04-55>
3. Кулик К.Н. Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов. Волгоград: Изд-во ВНИАЛМИ, 2004. 248 с. EDN: QKWSZD.
4. Кулик К.Н., Рулев А.С., Манаенкова Н.С. Аэрокосмические методы изучения динамики деградации и восстановления агроландшафтов степной и полупустынной зон // Степи Евразии. Сохранение природного разнообразия и мониторинг состояния экосистем. Оренбург, 1997. С. 155–156.
5. 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.
6. Дорошенко В.В. Динамика площади открытых песков на северо-востоке Ставропольского края в 2022 г. // Геогр. вестн. 2023. № 4(67). С. 127–136. EDN: VNKGFB. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-4-127-136>
7. Дорошенко В.В. Геоинформационное картографирование сорových понижений и солончаков в Ставропольском крае // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 4(68). С. 553–561. EDN: ANQIZK. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-04-64>
8. Лапенко Н.Г., Ерошенко Ф.В., Сторчак И.Г. Растительность степных фитоценозов и особенности ее вегетации в условиях Ставропольского края // Агр. вестн. Урала. 2020. Т. 193, № 2. С. 9–19. EDN: FEMOAC. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-193-2-9-19>
9. Дорошенко В. В. Оценка ежемесячной динамики площадей открытых песков на востоке Ставропольского края в 2023 г. // Геодезия и картография. 2024. Т. 85, № 4. С. 10–19. EDN: ECIZCT. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1006-4-10-19>
10. Биарсланов А.Б., Шинкаренко С.С., Гаджиев И.Р. Картографирование и анализ сезонной динамики площадей опустынивания на севере Дагестана по ежемесячным композитам Sentinel-2 // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 1. С. 160–175. EDN: SDCLDS. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-160-175>
11. Юферев В.Г., Кулик К.Н., Пугачева А.М. [и др.] Геоинформационное картографирование опустынивания аридных, субаридных и сухих субгумидных регионов Российской Федерации на основе данных дистанционного зондирования и полевых исследований : тестовая модель методики. Волгоград : ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 2024. 272 с. EDN: KQBZAY.
12. Юферев В.Г., Синельникова К.П., Берденгалиева А.Н. Геоинформационное картографирование дефляционно-опасных участков земель сельскохозяйственного назначения с использованием космоснимков // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2(70). С. 125–134. EDN: DYBPRY. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-02-14>
13. Дорошенко В.В. Пыльные бури на востоке Ставропольского края в 2017–2022 гг. // Вопросы степеведения. 2023. № 3. С. 41–48. EDN: JVUYFD. <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2023-3-41-48>
14. Дзыбов Д.С. Растительность Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС, 2018. 492 с.
15. 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(225). С. 58–66. EDN: QNECFU. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-58-66>

References

1. Lapenko N. G., Khonina O. V. Assessment of pasture digression of steppe ecosystems in the arid zone of Stavropol. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex*. 2022;36(5):16-20. (In Russ.). EDN: NOICIN. https://10.53859/02352451_2022_36_5_16

2. Yuferev V.G., Belyaev A.I., Sinelnikova K.P. Desertification of agricultural lands in the Chernozemelsky district of Kalmykia. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2022;(4):465-473. (In Russ.). EDN: LAEWWU. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-04-55>
3. Kulik K. N. *Agroforestry mapping and phytocological assessment of arid landscapes*. Volgograd: Publishing House of the All-Union Research Institute of Agroforestry; 2004. 248 p. (In Russ.). EDN: QKWSDZ.
4. Kulik K.N., Rulev A.S., Manaenkova N.S. Aerospace methods for studying the dynamics of degradation and restoration of agro-landscapes of steppe and semi-desert zones. *Steppes of Eurasia. Conservation of natural diversity and ecosystem monitoring*. Orenburg, 1997:155-156. (In Russ.).
5. Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S. Geoinformation analysis of desertification in the Northwestern Caspian region. *Arid Ecosystems*. 2020;26(2):16-24. (In Russ.). EDN: TJYXNB.
6. Doroshenko V.V. Dynamics of the area of open sands in the north-east of the Stavropol Territory in 2022. *Geographical Bulletin*. 2023;(4):127-136. (In Russ.). EDN: VNKGFB. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-4-127-136>
7. Doroshenko V.V. Geoinformation mapping of rock depressions and salt marshes in the Stavropol Territory. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2022;(4):553-561. (In Russ.). EDN: AHQIZK. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-04-64>
8. Lapenko N. G., Eroshenko F. V., Storchak I. G. Vegetation of steppe phytocenoses and features of its vegetation in the Stavropol Territory. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020;193(2):9-19. (In Russ.). EDN: FEMOAC. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-193-2-9-19>
9. Doroshenko V.V. Assessment of the monthly dynamics of the areas of open sands in the east of the Stavropol Territory in 2023. *Geodesy and Cartography*. 2024;85(4):10-19. (In Russ.). EDN: ECIZCT. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1006-4-10-19>
10. Biarslanov A.B., Shinkarenko S.S., Gadzhiev I.R. Mapping and analysis of seasonal dynamics of desertification areas in the north of Dagestan using monthly Sentinel-2 composites. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. 2023;20(1):160-175. (In Russ.). EDN: SDCLDS. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-160-175>
11. Yuferev V.G., Kulik K.N., Pugacheva A.M. et al. *Geoinformation mapping of desertification in arid, sub-arid and dry subhumid regions of the Russian Federation based on remote sensing and field research data: A test model of the methodology*. Volgograd: Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences Press; 2024. 272 p. (In Russ.). EDN: KQBZAY.
12. Yuferev V.G., Sinelnikova K.P., Berdengalieva A.N. Geoinformation mapping of deflation-hazardous agricultural land plots using satellite images. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2023;(2):125-134. (In Russ.). EDN: DYBPRY. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-02-14>
13. Doroshenko V.V. Dust storms in the east of the Stavropol Territory in 2017-2022. *Questions of Steppe Studies*. 2023;(3):41-48. (In Russ.). EDN: JVUYFD. <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2023-3-41-48>
14. Dzybov D.S. *Vegetation of the Stavropol Territory*. Stavropol: AGRUS; 2018. 492 p. (In Russ.).
15. Asvarova T.A., Hasanov G.N., Usmanov R.Z., Gadzhiev K.M., Abdulayeva A.S., Bashirov R.R., Gimbatova K.B. The influence of climatic indicators on 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.). EDN: QNECFU. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-58-66>

Информация об авторах

В.В. Дорошенко – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов ФНЦ агроэкологии РАН.

И.А. Болгов – младший научный сотрудник лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов ФНЦ агроэкологии РАН.

Information about the authors

V.V. Doroshenko – Candidate of Sciences (Agricultural), Researcher of the Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes, FSCA RAS.

I.A. Bolgov – Junior Researcher of the Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes, FSCA RAS.

*Статья поступила в редакцию 15.07.2025; одобрена после рецензирования 18.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 15.07.2025; approved after reviewing 18.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Научная статья

УДК 549.0+669.181.28 (470.5)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-63-71>

МИНЕРАЛОГИЯ ШЛАКОВ ЛЯЛИНСКОГО МЕДНОГО ЗАВОДА (СЕЛО КАРАУЛЬСКОЕ, СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

**Юрий Викторович Ерохин^{1✉}, Владимир Сергеевич Пономарев²,
Любовь Владимировна Леонова³**

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

¹erokhin-yu@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-0577-5898>

²p123v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1651-1281>

³lleonova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7713-8994>

Аннотация. Приводятся результаты исследования минералогии медных шлаков из старинного Лялинского завода, действовавшего в 1724–1779 гг. в окрестностях села Караул (ныне – Караульское). Завод основан генералом В.И. де Генниным и стал первым казенным (государственным) медеплавильным предприятием на Северном Урале. На заводе плавил руды из Лялинского, Павдинского и Конжаковского рудников. Установлено, что медные шлаки сложены пироксеном (диопсид, геденбергит) с постоянным присутствием плагиоклаза (анортит), а также кириштейнита, фаялита, стекла, герцинита, троилита и сульфидов меди-железа (борнит и «расплавные твердые растворы»). Кроме того, найдены медь с высокой примесью серебра и когениит. Из вторичных минералов установлены малахит, куприт, хризоколла и халькосидерит. Наличие сульфидов в медных шлаках Лялинского завода говорит о том, что в качестве руды при плавке использовался медный колчедан из рудников Серебрянского камня. Шлаки можно переработать с выделением сульфидного концентрата с ценными металлами, а оставшуюся алюмосиликатную массу использовать как сырье для изготовления тепло- и звукоизоляционной базальтовой ваты.

Ключевые слова: пироксен, плагиоклаз, сульфиды, медные шлаки, Лялинский медный завод, село Караульское, Свердловская область

Для цитирования: Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Леонова Л.В. Минералогия шлаков Лялинского медного завода (село Караульское, Свердловская область) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 63–71. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-63-71>

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 SLAGS FROM LYALINSKY COOPER PLANT (KARAULSKOYE VILLAGE, SVERDLOVSK REGION)

Yuriy V. Erokhin^{1✉}, Vladimir S. Ponomarev², Lubov V. Leonova³

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

¹erokhin-yu@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-0577-5898>

²p123v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1651-1281>

³lleonova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7713-8994>

© Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Леонова Л.В., 2025

Abstract. The paper presents the results of a study of the mineralogy of copper slags from the old Lyalinsky plant, which operated in 1724-1779 in the vicinity of the village of Karaul (now Karaulskoye). The plant was founded by General V.I. de Gennin and became the first state-owned copper smelter in the Northern Urals. The plant smelted ores from the Lyalinsky, Pavdinsky and Konzhakovsky mines. Our studies have established that the copper slags are composed of pyroxene (diopside, hedenbergite) with the constant presence of plagioclase (anorthite), as well as kirsteinite, fayalite, glass, hercynite, troilite and copper-iron sulfides (bornite and "melt solid solutions"). In addition, copper with a high admixture of silver and cohenite were found. Of the secondary minerals, malachite, cuprite, chrysocolla and chalcocite have been identified. The presence of sulphides in the copper slags of the Lyalinsky plant indicates that copper pyrites from the Serebryansky stone mines were used as ore during smelting. The slags can be processed with the release of sulphide concentrate with valuable metals, and the remaining aluminosilicate mass can be used as raw material for the production of heat and sound insulating basalt wool.

Keywords: pyroxene, plagioclase, sulfides, copper slags, Lyalinsky copper plant, Karaulskoye village, Sverdlovsk region

For citation Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Leonova L.V. Mineralogy of Slags from Lyalinsky Cooper Plant (Karaulskoye Village, Sverdlovsk Region). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):63-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-63-71>

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

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

Введение

Северный Урал, в том числе и Лялинский район, стал осваиваться русскими людьми значительно раньше Среднего Урала. После успешного сибирского похода Ермака (1581–1585 гг.) перед Русским царством встала нелегкая задача по освоению завоёванных земель в Сибири. Для её решения по указу царя Федора I Ивановича (1557–1598 гг.) через Уральский хребет в течение 1595–1597 гг. была построена Бабиновская дорога, которая соединила г. Соликамск и г. Верхотурье (основан в 1598 г.). Построил дорогу посадский человек Артемий Бабинов с приданными ему 400 крестьянами. Дорога функционировала почти 200 лет и помогла активно продвигаться нашим предкам в этой части Урала, а также закрепиться в Западной Сибири. Для охраны дороги от набегов коренных жителей построили несколько поселений (караулов) – Растесский, Павдинский и Лялинский [1]. Последний был основан в 1599 г. и со временем стал называться просто Караул, так как в селе находился караульно-таможенный пост, контролирующий провоз товаров в Сибирь, а также центр по сбору ясака (пушнины) с местных вогулов и манси. Так получилось, что русские поселения Северного Урала в основном занимались торговлей с местным населением и охраной торговых путей. Промышленное освоение региона началось только после налаживания металлургического производства на Среднем Урале. Собственно, Лялинский медный завод стал первым металлургическим предприятием на Северном Урале, и в настоящей работе мы приводим результаты изучения минералогии его шлаков.

Краткая история Лялинского завода

Медную руду обнаружил на реках Лобва и Ляля верхотурский житель Конон Заварин, о чем он заявил в 1719 г. руководству Уктусского завода. В 1722 г. команда рудознатцев из Уктуса отобрала пробы руд, которые оказались богатыми. В 1723 г. в пяти верстах от с. Караул (ныне – Караульское) стали разрабатывать жилу медного колчедана, найденную Власом Коптяковым. При посещении рудника генерал В.И. де Геннин (тогда начальник уральских и сибирских заводов) предложил поставить здесь же медеплавильный завод, чтобы возить на Уктусский завод не руду, а сразу металл. Уже в августе 1724 г. в с. Караул заработал построенный при впадении р. Каменка в р. Ляля медеплавильный завод, включающий в себя медеплавильную фабрику, молот для дробления руды, кузницу, 12 печей для обжига роштейна, а также печи для получения поташа (карбонат калия) и стекла. Здесь же находились многочисленные постройки для обслуживающего пер-

сонала, хранения готовой продукции, древесного угля и известняка. К заводу были приписаны крестьяне из 18 окружающих деревень и сел Верхотурского уезда. В 1725–1727 гг. на предприятии дополнительно действовало купоросное производство, а в 1728–1729 гг. наладили изготовление поташа. Кроме того, в 1726 г. из медного шлака стали делать стеклянную посуду, но в конце года прекратили (всего изготовили 2049 посуды и отправили в Екатеринбург) [2, 3].

В 1727 г. Лялинский медный рудник близ завода истощился и руду стали возить с Павдинского рудника, найденного тем же В. Коптяковым. Этот рудник располагался далеко от завода (в 103 верстах) и уже в 1728 г. был выработан. Срочные поиски нового рудного места В. Коптяковым и его сыном Сидором увенчались успехом в 1729 г., когда на Конжаковском Камне они нашли богатые жилы медного колчедана. Участок находился немного ближе (в 83 верстах) и обрабатывался только в летний период. Каждый год здесь добывалось до 40 тыс. пудов руды. Завод действовал вплоть до 1744 г., а потом был остановлен из-за дороговизны добычи и доставки руды. В 1772 г. его попытались восстановить частные инвесторы, но дела шли тяжело и в 1779 г. он окончательно закрылся [2, 3].

Лялинский завод и его строения до наших дней не сохранились, только на северной окраине села отмечается мощная дамба высотой до 10 м, хорошо выраженная в рельефе (рис. 1). На месте завода сейчас стоит частный дом с большим огородом. Отвалы шлаков частично сохранились в виде небольших вывалов южнее плотины, а также вокруг современного моста через р. Каменка, который расположен в центре села. В целом создается ощущение, что шлакоотвал Лялинского завода активно использовали в современных дорожных работах. Шлаки достаточно однородные, имеют темную окраску и часто пленки вторичной медной минерализации. На свежем изломе они имеют темно-серую и коричневатую окраску. Размер образцов достигает 30 см.

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 Л.В. Леонова). 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. Неупкоева).

Результаты исследования

Химический состав шлака следующий, мас. %: SiO_2 – 41,42; TiO_2 – 0,94; Al_2O_3 – 18,68; $\text{FeO}_{\text{общ}}$ – 10,09; MgO – 6,01; MnO – 0,05; CaO – 20,05; K_2O – 0,41; Na_2O – 1,15; S – 0,21; Cu – 0,42; П.п.п. 1,21; сумма 100,64. Присутствие потерь при прокаливании указывает на вторичные изменения в шлаке.

В результате проведенных исследований оказалось, что отобранные медные шлаки сложены пироксеновым агрегатом с постоянным присутствием плагиоклаза и стекла, а также кирштейнита, фаялита, герцинита, троилита, сульфидов Cu-Fe, когенита и меди.

Пироксен является главным минералом в шлаке, он слагает сферические агрегаты и их скопления (рис. 2) с размером сферул до 2–3 мм в диаметре. Отдельные индивиды характеризуются зональным составом (таблица, анализ 1). В центральной части зерен пироксен более магниезильный (MgO – до 8,9 мас. %) и относится к диопсиду. При этом содержит повышенное количество глинозема (Al_2O_3 – до 18,2 мас. %). Краевая часть индивидов пироксена более железистая (FeO – до 14,0 мас. %) и относится к геденбергиту. При этом он становится менее магниезильным и глиноземистым.

Фаялит в шлаке – второстепенный минерал, обычно он слагает скелетные игольчатые и обычные призматические кристаллы размером до 10 мкм по удлинению в интерстициях между индивидами пироксена. Минерал характеризуется однородным составом (таблица, анализ 2–3) и относится к магниезильному фаялиту. По составу оливин ложится прямо на границу гиалосидерита и гортонолита. По данным пересчета он содержит миналы фаялита (50 %), форстерита (42 %), кальциооливина (7 %) и тейфрита (1 %).

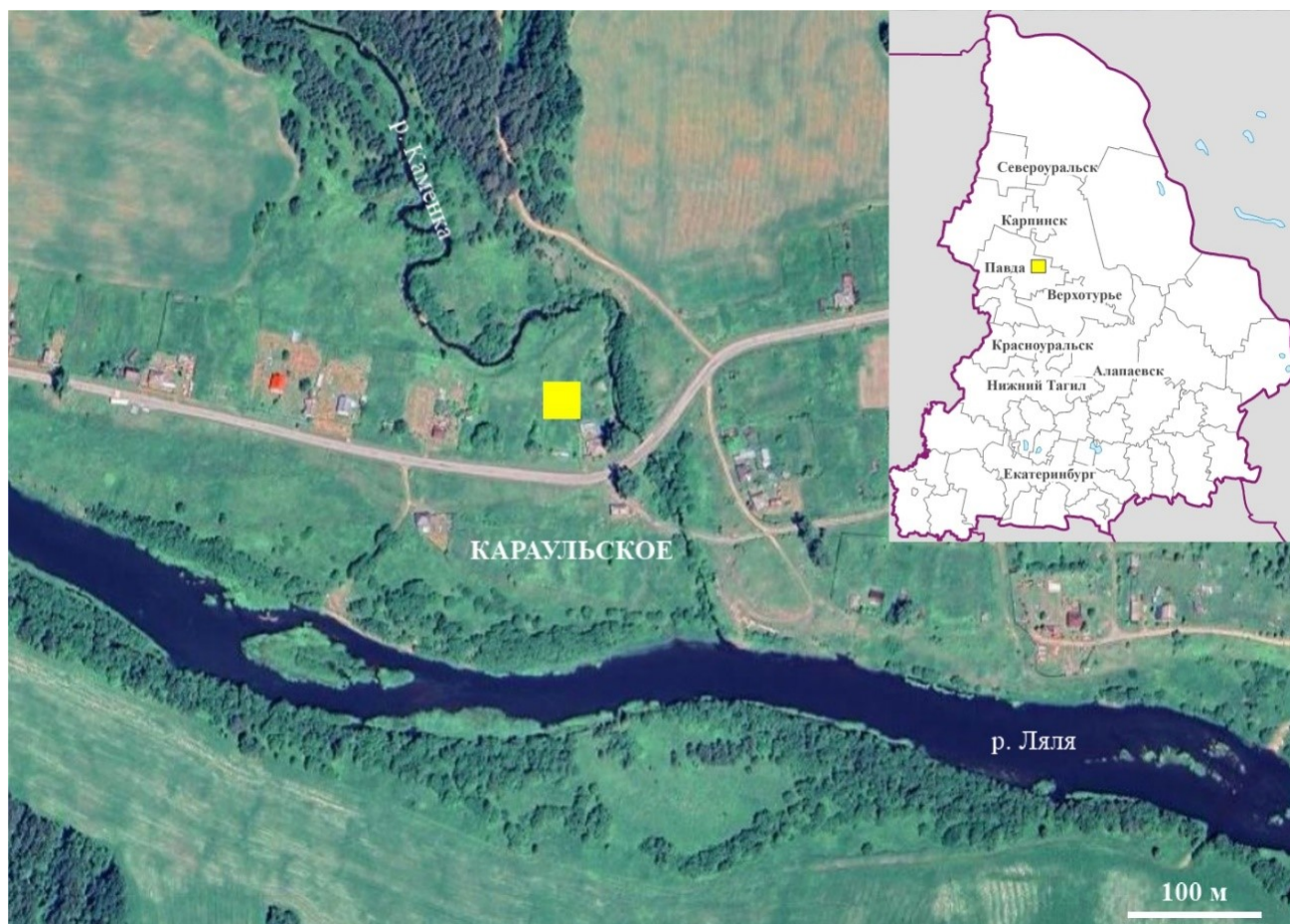


Рис. 1. Спутниковый снимок с. Караульское (получен с использованием сервиса «Гугл.Карты») с врезкой схемы Свердловской области. Желтым квадратом обозначено расположение Лялинского завода / Fig. 1. Satellite image of the village of Karaul'skoye (using the Google Maps service) with an inset map of the Sverdlovsk region. The yellow square indicates the location of the Lyalinsky plant

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

Анализ	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
1ц	41,98	1,05	18,20	6,24	–	8,86	23,67	100
1кр	42,08	0,76	14,53	14,01	–	5,83	22,79	100
2	34,35	–	–	41,04	0,64	19,15	4,82	100
3	34,52	–	–	40,80	0,62	19,51	4,55	100
4	32,19	–	–	36,74	0,49	3,08	27,50	100
5	32,65	–	–	35,63	0,65	3,50	27,57	100
Эмпирические формулы								
1ц	(Ca _{0,94} Fe _{0,06}) _{1,00} (Mg _{0,49} Al _{0,38} Fe _{0,13}) _{1,00} [(Si _{1,56} Al _{0,41} Ti _{0,03}) _{2,00} O ₆]							
1кр	(Ca _{0,93} Fe _{0,07}) _{1,00} (Fe _{0,38} Mg _{0,33} Al _{0,29}) _{1,00} [(Si _{1,61} Al _{0,37} Ti _{0,02}) _{2,00} O ₆]							
2	(Fe _{1,00} Mg _{0,83} Ca _{0,15} Mn _{0,02}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]							
3	(Fe _{0,99} Mg _{0,85} Ca _{0,14} Mn _{0,02}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]							
4	(Ca _{0,91} Fe _{0,09}) _{1,00} (Fe _{0,86} Mg _{0,14} Mn _{0,01}) _{1,01} [Si _{0,99} O ₄]							
5	(Ca _{0,91} Fe _{0,09}) _{1,00} (Fe _{0,82} Mg _{0,16} Mn _{0,02}) _{1,00} [Si _{1,00} O ₄]							

Примечание. Анализ 1ц – диопсид; анализ 1кр – геденбергит; анализы 2–3 – фаялит; анализы 4–5 – кирштейнит; ц – центр зерна; кр – краевая часть.

Кирштейнит является редким минералом, в шлаке образует призматические кристаллы размером до 15 мкм по удлинению на границе с сульфидными скоплениями. Индивиды имеют устойчивый состав (таблица, анализ 4–5) и вполне уверенно определяются как кирштейнит – минерал из группы монтичеллита. Он содержит значительную примесь магния (MgO – до 3,5 мас. %), что при пересчете показывает присутствие в кирштейните около 16 % минала монтичеллита.

Анортит – второстепенный минерал в шлаке. Он образует длиннопризматические индивиды размером до 1 мм по удлинению среди стекла (рис. 3). Представительный состав плагиоклаза, мас. %: SiO₂ – 45,91; Al₂O₃ – 34,27; Fe₂O₃ – 0,32; CaO – 18,63; Na₂O – 0,88, пересчитывается на формулу анортита (Ca_{0,92}Na_{0,08})_{1,00}[(Al_{1,87}Si_{2,12}Fe³⁺_{0,01})_{4,00}O₈].

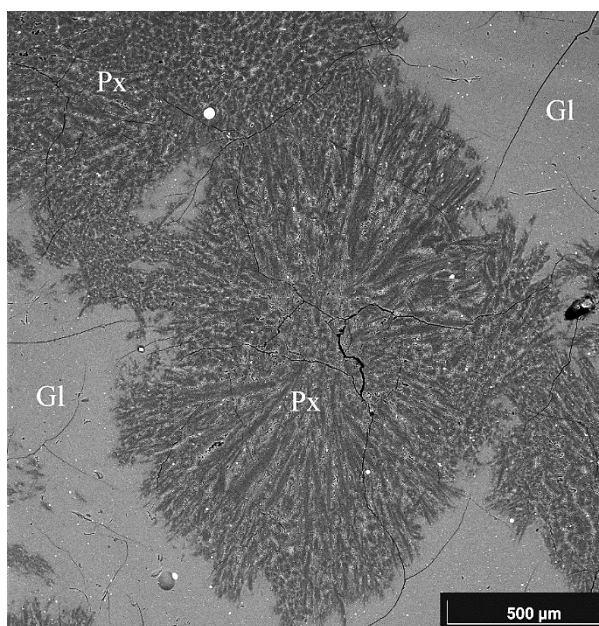


Рис. 2. Внешний вид медного шлака из Лялинского завода со сферолитами пироксена (Px) и окружающим стеклом (Gl) (здесь и далее – BSE-фото, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123) / Fig. 2. External view of copper slag from the Lyalinsky plant with pyroxene (Px) spherulites and surrounding glass (Gl) (from here on - BSE photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123)

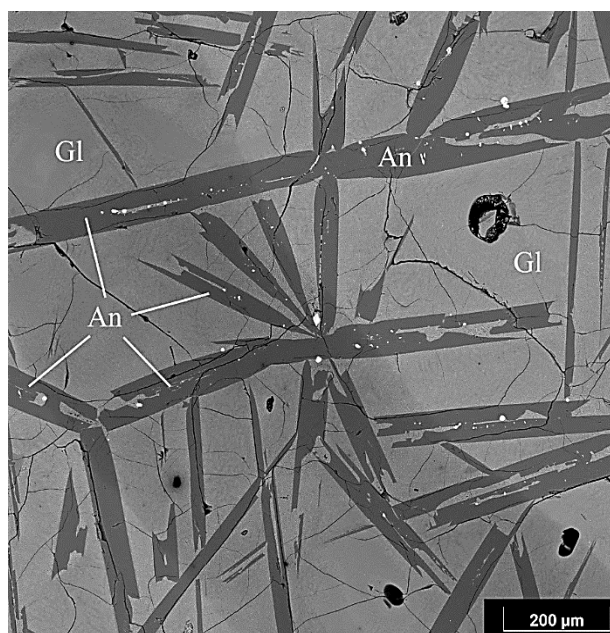


Рис. 3. Индивиды анортита среди стекла в медном шлаке: An – анортит; Gl – стекло / Fig. 3. Relationships between minerals and glass in copper slag: An – anorthite; Gl – glass

Стекло служит главным веществом в изученных шлаках, что, по всей видимости, связано с технологическими процессами на данном заводе. Ведь неслучайно именно здесь выпускали стеклянную посуду. В целом стекло представлено двумя типами – внешним и внутренним. Внешнее облекает все раскристаллизованные шлаки и по массе преобладает. По составу оно идентично химическому составу шлака, что логично, так как это расплавленный шлак. Внутреннее выполняет интерстиции между индивидами раскристаллизованной матрицы и встречается редко. Представительный состав внутреннего стекла следующий, мас. %: SiO₂ – 43,84; Al₂O₃ – 21,34; FeO – 16,05; MgO – 0,56; CaO – 6,05; Na₂O – 8,70; K₂O – 3,47. На диаграмме TAS для вулканитов это стекло попадает в поле щелочных ультраосновных фойдитов.

Герцинит встречается в шлаке крайне редко в виде единичных зерен квадратного сечения размером до 10 мкм. вблизи скоплений сульфидов. Представительный состав шпинелида, мас. %: TiO₂ – 1,71; Al₂O₃ – 49,96; V₂O₃ – 0,55; Fe₂O₃ – 11,45 (по стехиом.); FeO – 30,43; MgO – 5,90, имеет формулу (Fe²⁺_{0,74}Mg_{0,26})_{1,00}(Al_{1,70}Fe³⁺_{0,25}Ti_{0,04}V_{0,01})_{2,00}O₄. По данным пересчета герцинит содержит миналы шпинели (до 26 %), магнетита (до 12 %) и ульвошпинели (до 2 %).

Троилит слагает включения в медно-железистых сульфидах размером до 30 мкм (рис. 4). Представительный состав сульфида следующий, мас. %: S – 36,24; Fe – 61,67; Cu – 2,09, он хо-

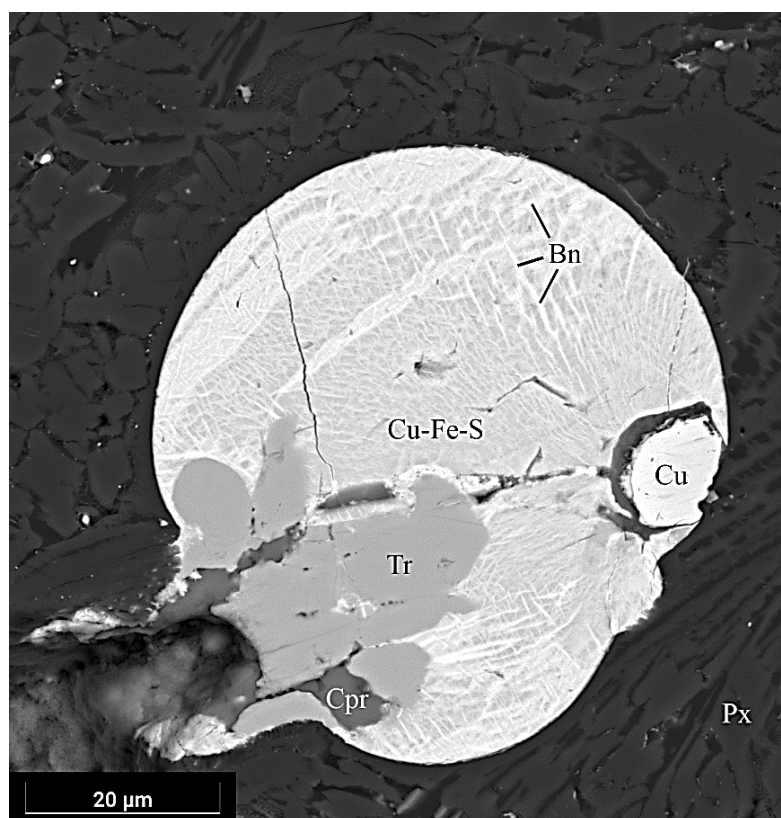


Рис. 4. Включения троилита и меди в сульфидной сферуле:
Tr – троилит; Cu – медь; Bn – борнит; Cu-Fe-S – сульфидный
«расплавный твердый раствор»; Cpr – куприт; Px – пироксен
/ Fig. 4. Inclusions of troilite and copper in a sulfide spherule:
Tr – troilite; Cu – copper; Bn – bornite; Cu-Fe-S – sulfide
“melt solid solution”; Cpr – cuprite; Px – pyroxene

Медь образует округлые включения размером до 20–25 мкм в сульфидных шариках (рис. 4). Причем металл приурочен к краевым частям сферул. По составу медь достаточно чистая, из примесей отмечаются Fe (2,3–4,5 мас. %), Cr (0,4–0,8 мас. %) и Ni (0,4–1,0 мас. %), а также присутствие Ag (до 9,5 мас. %, в среднем 2,5–2,8 мас. %).

Когенит слагает скорлуповатые и округлые включения размером до 5 мкм в матрице меди. На фоне более светлого (в BSE-изображении) металла он выглядит темнее. Химический состав, мас. %: Fe – 64,20; Ni – 21,38; Co – 5,14; Cu – 2,62; C – 6,58, что хорошо пересчитывается на формулу когенита $(\text{Fe}_{2,10}\text{Ni}_{0,67}\text{Co}_{0,16}\text{Cu}_{0,07})_{3,00}\text{C}_{1,00}$. Когенит, или цементит (металлургический термин), является характерным минералом чугуноплавильных шлаков, чугуна и углеродистых сталей [5], но в медных шлаках до сих пор не описывался. При этом в природе когенит находили в железных метеоритах, базальтах и даже в кимберлитах [6].

Из вторичных минералов в медных шлаках Лялинского заовда установлены малахит, куприт, хризоколла и халькосидерит. Первые два развиваются по скоплениям сульфидов и меди, а последние образуют маломощные прожилки в породе и налеты на ней.

Обсуждение результатов исследования

В результате проведенного исследования минеральный состав медных шлаков Лялинского завода выглядит следующим образом. Силикатная составляющая породы сложена пироксенами (диопсидом, геденбергитом), анортитом, фаялитом, кирштейнитом и стеклом. Окислы характеризуются герцинитом и купритом (вторичный минерал). Халькогениды в основном представлены троилитом и Cu-Fe-сульфидами (половина составов определяется как борнит). Присутствует самородная медь и когенит.

рошо пересчитывается на формулу троилита $(\text{Fe}_{0,97}\text{Cu}_{0,03})_{1,00}\text{S}_{1,00}$. Примесь меди варьирует от 1,65 до 2,1 мас. %.

Сульфиды Cu-Fe рассеяны по всей матрице шлака и тяготеют к скоплениям пироксена и плагиоклаза. Они образуют мелкие и относительно крупные сферулы (шарики) размером до 70 мкм в диаметре. По составу сульфидные шарики неоднородные (со структурами распада) и содержат включения троилита и металлической меди (рис. 4). Химический состав светлых (в BSE-изображении) зон следующий, мас. %: S – 23,98–26,68; Fe – 9,72–12,26; Cu – 61,46–65,12, что хорошо сопоставляется с борнитом $(\text{Cu}_5\text{FeS}_4 - \text{S} - 25,6; \text{Fe} - 11,1; \text{Cu} - 63,3)$. При этом состав темных зон существенно более железистый, мас. % S – 28,51–29,32; Fe – 19,07–21,15; Cu – 49,53–52,94. Природных сульфидов с таким составом пока не установлено, но подобные «расплавные твердые растворы» системы $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_{2+y}\text{S}_{2-z}$ синтезированы [4].

По своему минеральному составу (с преобладанием основного плагиоклаза, пироксена и сульфидов) вещество напоминает медные шлаки Уктусского [7] и Полевского (по нашим данным) уральских заводов того же временного интервала (начала XVIII в.).

Наличие сульфидов в медных шлаках Лялинского завода говорит о том, что в качестве руды при плавке использовался медный колчедан. Изученные шлаки были получены при плавке сульфидных руд из Конжаковского Камня, а точнее его восточного отрога – Серебрянского Камня, где и были расположены медные рудники. В наиболее крупных из них – Гилевском и Конжаковском – в массивных габброидах отрабатывались жилы и шпиры мощностью до 15 см, сложенные халькопиритом и борнитом [8]. Во-первых, руды с Серебрянского Камня плавилась на предприятии на протяжении 15 лет (1729–1744 гг.), а с Лялинского рудника – 3 года (1724–1727 гг.) и Павдинского – 1 год (1727–1728 гг.). К тому же в первые годы работы завода из шлаков делалась стеклянная посуда. Во-вторых, об этом говорит химический состав металлической выплавки в шлаке. Медь Лялинского завода обогащена серебром, а значит, и исходные сульфидные руды должны были быть серебросодержащими. Недавно установлено, что халькопирит из медных рудников Серебрянского Камня в среднем содержит 350 г/т серебра, а борнит иногда отличается ураганными количествами этого благородного металла – до 800 г/т [9]. Включения когенита в меди отличаются высоким содержанием никеля и кобальта, что характерно для карбида железа из метеоритов и ультраосновных пород [10, 11]. При этом Серебрянский Камень сложен габброидами и входит в состав большого Кытлымского дунит-клинопироксент-габбрового массива [12, 13], что отразилось на геохимическом составе халькопирита и борнита, которые содержат до 236 г/т никеля и до 6 г/т кобальта [9].

Температуру плавки медных руд на Лялинском заводе можно определить по нескольким минералам-реперам. Так, температура плавления/кристаллизации троилита экспериментально оценивается в узком интервале 1186–1193 °С [14]. Кристаллизация когенита/цементита в системе Fe-Fe₃C происходит при 1147 °С [15], а образование когенита в метеоритах оценивается в пределах 950–1050 °С [16]. При этом «расплавные твердые растворы» системы Cu_{1-x}Fe_{2+y}S_{2-z}, подобные изученным в шлаках, синтезируются в диапазоне температур от 1012 до 325 °С [4]. Таким образом, кристаллизация исследованных шлаков происходила в интервале 1200–1000 °С.

Медные шлаки Лялинского завода могут быть переработаны. Есть возможность извлечь из них сульфидный концентрат (при помощи флотации) с попутными металлами (медь, серебро, железо, никель и кобальт), которые находятся внутри сульфидных шариков. Особый интерес представляет примесь серебра в меди, которая существенно повышает рентабельность переработки шлака. Основную матрицу шлака (пироксены+плагиоклаз) допускается использовать как сырье для изготовления тепло- и звукоизоляционной базальтовой ваты.

Оценить объемы отвалов шлака Лялинского завода достаточно сложно, потому что почти вся бывшая территория предприятия находится в частных владениях (под домами и огородами). Очевидно, что часть отвала бывшего завода сохранилась до наших времен, так как с использованием этого шлака был отстроен новый мост в селе и прилегающая к нему дорога.

Заключение

Таким образом, нами впервые изучена минералогия медных шлаков Лялинского завода, действовавшего в период с 1724 по 1779 г. Установлено, что медные шлаки сложены пироксеном (авгит, геденбергит), плагиоклазом (анортит) и стеклом, а также кирштейнитом, фаялитом, герцинитом, троилитом, борнитом, сульфидами Cu-Fe, когенитом и медью. Изученные шлаки образовались в результате плавки медного колчедана, добываемого из рудопроявлений Серебрянского Камня.

Список источников

1. Бординских Г.А., Шилов В.В. Бабиновская дорога – путь длиной в 400 лет. Березники: Тип. купца Тарасова, 1998. 45 с.
2. Металлургические заводы Урала XVII–XX вв.: энциклопедия / гл. ред. В.В. Алексеев. Екатеринбург: Академкнига, 2001. 536 с.

3. Генин В.И. Описание уральских и сибирских заводов. Екатеринбург: Грачёв и партнёры, 2022. 491 с.
4. Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. Melt crystallization of CuFe_2S_3 in the Cu-Fe-S system // *J. Thermal Analysis Calorimetry*. 2014. Vol. 115. P. 511–516. EDN: UEGUYZ. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3206-0>
5. Цементит в углеродистых сталях / гл. ред. В.М. Счастливцев. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2017. 380 с.
6. Jacob D.E., Kronz A., Viljoen K.S. Cohenite, native iron and troilite inclusions in garnets from polycrystalline diamond aggregates // *Contributions Mineralogy Petrology*. 2004. Vol. 146. P. 566–576. EDN: XSXMWK. <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0518-2>
7. Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Фаррахова Н.Н. Минералогия медных шлаков из Уктусского металлургического завода // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2025. № 1. С. 80–87. EDN: QNAFPQ. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-80-87>
8. Кашин С.А. Медно-титаномagnetитовое оруденение в основных интрузивных породах Урала // *Тр. ИГН АН СССР*. М.: 2-я тип. АН СССР, 1948. Вып. 91, № 9. 129 с.
9. Михайлов В.В., Степанов С.Ю., Козлов А.В., Петров С.В., Паламарчук Р.С., Шиловских В.В., Абрамова В.Д., Корнеев А.В. Новое медно-благороднометалльное рудопроявление в габбро массива Серебрянского Камня, Платиноносный пояс Урала (Северный Урал) // *Геология рудных месторождений*. 2021. Т. 63, № 6. С. 520–550. EDN: XQPPLH. <https://doi.org/10.31857/S0016777021060046>
10. Brett R. Cohenite: its occurrence and a proposed origin // *Geochimica Cosmochimica Acta*. 1967. Vol. 31. P. 143–159.
11. Rappengluck M.A. Natural iron silicides: A systematic review // *Minerals*. 2022. Vol. 12, № 2. Art. 188. EDN: JIHZJ. <https://doi.org/10.3390/min12020188>
12. Ефимов А.А., Ефимова Л.П. Кытлымский платиноносный массив. М.: Недра, 1967. 355 с.
13. Иванов О.К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Минералогия, петрология, генезис. Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. ун-та, 1997. 487 с.
14. Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. Свойства неорганических соединений. Л.: Химия, 1983. 389 с.
15. Оленева О.А., Селиванова О.В., Беликов С.В. Диаграмма состояния системы железо – углерод. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 56 с.
16. Li Y., Tang G.Q., Hsu W., Wu Y. In situ SIMS carbon isotopic analysis of carbon-bearing minerals in Nantan and Aletai iron meteorites: implications on genesis // *Atomic Spectroscopy*. 2022. Vol. 43, № 4. P. 329–336. EDN: XGITZE. <https://doi.org/10.46770/AS.2022.028>

References

1. Bordinskikh G.A., Shilov V.V. (1998). *Babinovskaya road – a path 400 years long*. Berezniki: Tarasov's Printing House; 45 p. (In Russ.).
2. Alexeev V.V., ed. *Metallurgical plants of the Urals in the 17th-20th centuries*. Encyclopedia. Yekaterinburg: Academic Book; 2001. 536 p. (In Russ.).
3. Gennin V.I. *Description of the Ural and Siberian plants*. Yekaterinburg: Grachev and Partners; 2022. 491 p. (In Russ.).
4. Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. Melt crystallization of CuFe_2S_3 in the Cu-Fe-S system. *J. of Thermal Analysis Calorimetry*. 2014;115:511-516. EDN: UEGUYZ. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3206-0>
5. Schastliltsev V.M., ed. *Cementite in carbon steels*. Yekaterinburg: Educational and Methodological Center of the Kirov Ural Polytechnic Institute Press; 2017. 380 p. (In Russ.).
6. Jacob D.E., Kronz A., Viljoen K.S. Cohenite, native iron and troilite inclusions in garnets from polycrystalline diamond aggregates. *Contributions Mineralogy Petrology*. 2004;146:566-576. EDN: XSXMWK. <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0518-2>
7. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Shiryaev 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.). EDN: QNAFPQ. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-1-80-87>
8. Kashin S.A. Copper-titanomagnetite mineralization in the main intrusive rocks of the Urals. *Proceedings of the Institute of Geological Sciences of the USSR Academy of Sciences*. 1948;91(9). 129 p. (In Russ.).
9. Mikhailov V.V., Stepanov S.Yu., Kozlov A.V., Petrov S.V., Palamarchuk R.S., Shilovskikh V.V., Abramova V.D., Korneev A.V. New copper-noble metal ore occurrence in the gabbro of the Serebryansky Kamen massif, Platinum Belt of the Urals (Northern Urals). *Geology Ore Deposits*. 2021;63(6):520-550. (In Russ.). EDN: XQPPLH. <https://doi.org/10.31857/S0016777021060046>
10. Brett R. Cohenite: its occurrence and a proposed origin. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 1967;31:143-159.

11. Rappengluck M.A. Natural iron silicides: A systematic review. *Minerals*. 2022;12(2):188. EDN: JIHZJ. <https://doi.org/10.3390/min12020188>
12. Efimov A.A., Efimova L.P. *Kytlym platinum-bearing massif*. Moscow: Mineral; 1967. 355 p. (In Russ.).
13. Ivanov O.K. *Concentrically zonal pyroxenite-dunite massifs of the Urals. Mineralogy, petrology, genesis*. Yekaterinburg: Ural State University Press; 1997. 487 p. (In Russ.).
14. Efimov A.I., Belorukova L.P., Vasilkova I.V., Chechev V.P. *Properties of inorganic compounds*. Leningrad: Chemistry; 1983. 389 p. (In Russ.).
15. Oleneva O.A., Selivanova O.V., Belikov S.V. *State diagram of the iron-carbon system*. Yekaterinburg: Kirov Ural Polytechnic Institute Press; 2006. 56 p. (In Russ.).
16. Li Y., Tang G.Q., Hsu W., Wu Y. In situ SIMS carbon isotopic analysis of carbon-bearing minerals in Nantan and Aletai iron meteorites: implications on genesis. *Atomic Spectroscopy*. 2022;43(4):329-336. EDN: XGITZE. <https://doi.org/10.46770/AS.2022.028>

Информация об авторах

Ю.В. Ерохин – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ИГГ УрО РАН.
В.С. Пономарев – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ИГГ УрО РАН.
Л.В. Леонова – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ИГГ УрО РАН.

Information about the authors

Yu.V. Erokhin – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, IGG UB RAS.
V.S. Ponomarev – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, IGG UB RAS.
L.V. Leonova – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, IGG UB RAS.

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена после рецензирования 05.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 24.04.2025; approved after reviewing 05.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 556.557

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-72-82>

АБИОТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ В ЗАРАСТАНИИ ОЗЕР ПРИБРЕЖНО-ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

И.И. Зиганшин¹, **Д.В. Иванов²**, **А.Б. Александрова³**, **В.С. Валиев⁴**, **Р.Р. Хасанов⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5}Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

¹ irek.ziganshin@tatar.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4449-3444>

² water-rf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2822-4623>

³ adabl@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2303-6156>

⁴ podrost@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8848-5326>

⁵ rustamkhasanov88@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4768-5524>

Аннотация. Исследование направлено на изучение взаимосвязи зарастания озер и абиотических факторов, включающих морфометрические характеристики, физико-химические свойства донных отложений и гидрохимические показатели. Объекты – озера различного генезиса (отчлененные заливы Куйбышевского водохранилища, суффозионно-карстовые и карстовые озера, искусственные водоемы), расположенные на территории охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского биосферного заповедника. Выявлено, что мелководность (глубина до 2 м) и высокая доля литоральной зоны (>50 % акватории) являются ключевыми факторами ускоренного зарастания озер прибрежно-водной растительностью (главным образом тростником южным (*Phragmites australis*) и рогозом узколистным (*Typha angustifolia* L.)). Гидрохимические показатели (минерализация, жесткость, ХПК, БПК₅) и гранулометрический состав донных отложений (преобладание илистых фракций) статистически значимо влияют на развитие макрофитов. Виды растительности демонстрируют избирательность к субстратам: *Phragmites australis* доминирует на песчаных грунтах, *Typha angustifolia* L. – на илистых. Результаты факторного анализа подтвердили роль двух ортогональных факторов: минерализации вод и параметров литорали. Исследование доказало важность применения комплексного подхода в мониторинге водных объектов с целью эффективного управления ими в современных условиях.

Ключевые слова: озера, прибрежно-водная растительность, абиотические факторы, зарастание, корреляционный анализ, Волжско-Камский биосферный заповедник

Для цитирования: Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Александрова А.Б., Валиев В.С., Хасанов Р.Р. Абиотические факторы в зарастании озер прибрежно-водной растительностью // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 72–82. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-72-82>

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан», № 98/2024-ПД.

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

Original article

ABIOTIC FACTORS IN THE OVERGROWTH OF LAKES BY COASTAL AQUATIC VEGETATION

I.I. Ziganshin¹, **D.V. Ivanov²**, **A.B. Alexandrova³**, **V.S. Valiev⁴**, **R.R. Khasanov⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Research Institute for Problem of Ecology and Mineral Water Use of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Russia

¹ irek.ziganshin@tatar.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-4449-3444>

² water-rf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2822-4623>

³ adabl@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2303-6156>

⁴ podrost@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8848-5326>

⁵ rustamkhasanov88@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4768-5524>

Abstract. This study assesses the relationship between lake overgrowing and abiotic factors, including morphometric characteristics, physical and chemical properties of bottom sediments, and hydrochemical parameters. The research objects were lakes of different origins (detached bays of the Kuibyshev Reservoir, suffusion-karst, karst, and artificial water bodies) located within the buffer zone of the Saralinsky section of the Volga-Kama Biosphere Reserve. It was found that low maximum depths (up to 2 m) and a high proportion of the littoral zone (>50 % of the water area) are key factors in the accelerated overgrowing of these lakes with aquatic vegetation, primarily common reed (*Phragmites australis*) and narrow-leaved cattail (*Typha angustifolia* L.). The development of macrophytes was found to be significantly influenced by hydrochemical parameters (mineralization, water hardness, COD, BOD₅) and the granulometric composition of bottom sediments (predominance of silty fractions). The studied species exhibit substrate selectivity: *Phragmites australis* dominates on sandy substrates, while *Typha angustifolia* L. dominates on silty substrates. The results of factor analysis confirmed the role of two orthogonal factors: water mineralization and littoral zone parameters. The study results highlight the importance of employing an integrated approach in monitoring water bodies for their effective management under current conditions.

Keywords: lakes, coastal aquatic vegetation, abiotic factors, overgrowth, correlation analysis, Volga-Kama Biosphere Reserve

For citation: Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Alexandrova A.B., Valiev V.S., Khasanov R.R. Abiotic Factors in the Overgrowth of Lakes by Coastal Aquatic Vegetation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):72-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-72-82>

Acknowledgments: the publication was prepared within the framework of the implementation of the grant of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young Candidates of Sciences for the purpose of defending a Doctoral dissertation, performing scientific-research works, as well as performing labor functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific-Technological Development of the Republic of Tatarstan", No. 98/2024-PD.

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

Введение

Активная эксплуатация водных ресурсов привела к значимому сокращению запасов и ухудшению качества поверхностных и подземных вод в разных регионах мира. Наиболее катастрофично негативные изменения проявляются для малых замкнутых водоемов, которые за достаточно короткий период времени мелеют и зарастают высшей водной растительностью [1].

Высшая водная растительность выполняет широкий спектр экосистемных функций, в значительной мере обеспечивая внутриводоемные механизмы самоочищения природных вод от загрязняющих веществ [2–6]. У малых озер, наряду с положительными эффектами, при избыточном их зарастании нередко отмечается снижение качества их вод, выражаемое в росте концен-

траций в воде легко- и трудноокисляемых органических веществ, биогенных элементов, дефиците растворенного кислорода, заморных явлениях. В конечном счете зарастание отражается на санитарно-гигиеническом состоянии озёр и ведёт к снижению их рекреационного потенциала. Характер и течение процессов зарастания определяются комплексом биотических и абиотических факторов среды. В число последних входят морфометрические параметры водоёма, а также показатели состава и свойства воды и донных отложений [7, 8].

Цель исследования – анализ взаимосвязи зарастания озёр прибрежно-водной растительностью и ключевых абиотических факторов.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись 13 озёр различного генезиса (отчлененные заливы Куйбышевского водохранилища, суффозионно-карстовые и карстовые озера, искусственные водоемы), расположенные в охранной зоне Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника, в южной части Волго-Мешинского междуречья (Республика Татарстан) (рис. 1).

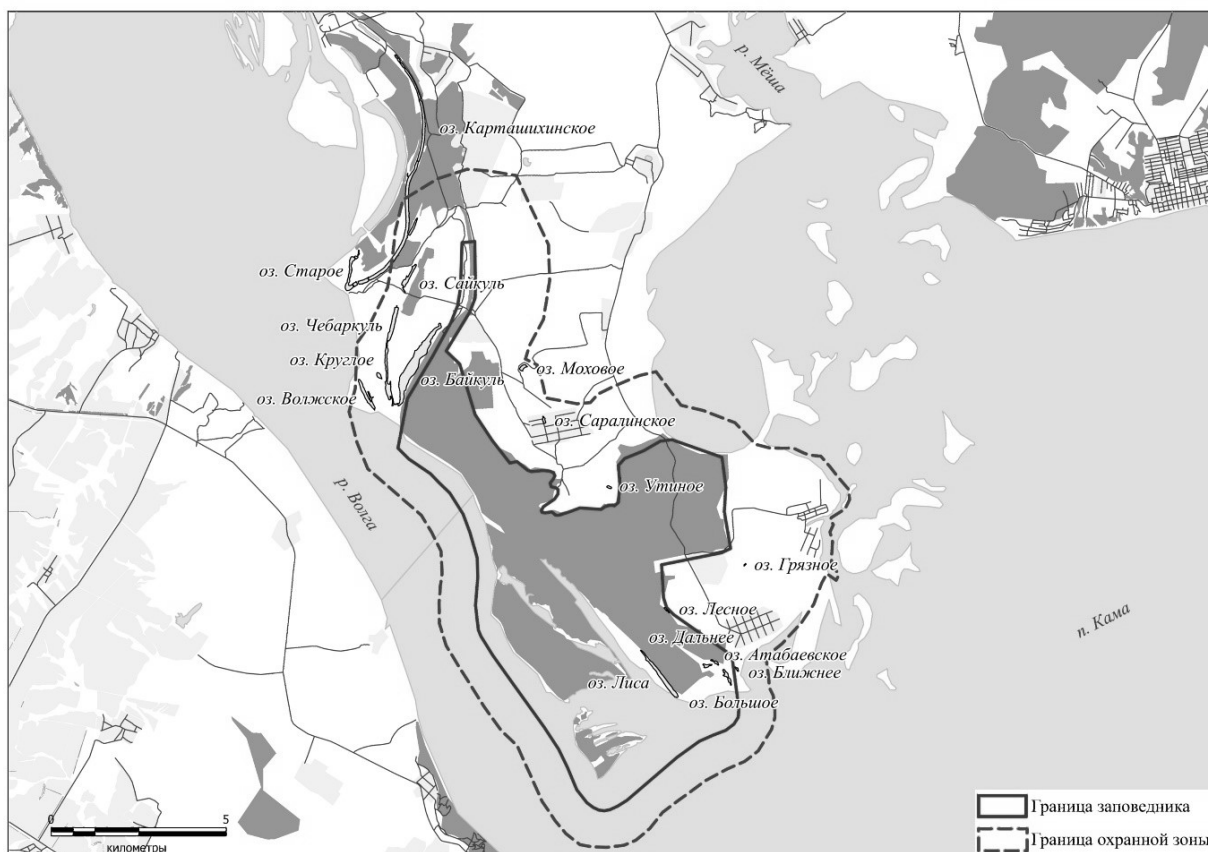


Рис. 1. Карта-схема расположения объектов исследования
/ Fig. 1. Map-scheme of the location of research objects

В работе использовали материалы полевых и лабораторных исследований, характеризующие состав и свойства поверхностных вод и донных отложений озёр, за период 2021–2024 гг. [9–11], а также морфометрические параметры (всего 94 параметра). Вычисление морфометрических показателей, построение батиметрических карт и карт зарастания прибрежно-водной растительностью осуществлялись в ГИС Mapinfo Pro 16.0. Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета Statistica 8.0. Оценка зависимости зарастания от анализируемых параметров осуществлялась с помощью коэффициента корреляции Спирмена. Выбор гидрохимических показателей обоснован методом многомерного статистического факторного анализа (главных компонент).

Результаты и обсуждение

Большинство исследованных озёр расположено на II надпойменной террасе р. Волги и представляет собой отчленённые заливы Куйбышевского водохранилища (образовано в 1955 г.), которые сформировались в результате естественных процессов, приведших к их изоляции от основной акватории (табл. 1). Наиболее крупные озёра – Карташихинское, Байкуль и Чебаркуль, площадь их акватории достигает 20–50 га. Для указанных водоёмов характерна сложная форма береговой линии, значительная площадь мелководий, что делает их чувствительными к изменениям гидрологического режима.

Таблица 1 / Table 1

**Гидрографические параметры и степень зарастания озёр
 / Hydrographic parameters and degree of lake overgrowth**

Озеро	Типы озёр	Координаты	S, га	Глубина, м		Объем, тыс. м ³	Литораль, %	Степень зарастания, %
				Сред.	Макс.			
II надпойменная терраса								
Байкуль	III*	N 55.35562 E 49.20193	52,2	1,4	2,7	747,5	23,6	19,5
Ближнее	III	N 55.27716 E 49.34850	0,4	0,8	1,2	3,4	99,4	90,1
Волжское	III	N 55.35791 E 49.18963	8,7	1,2	2,3	105,2	38	21,0
Карташихинское	III	N 55.40587 E 49.20283	58,2	0,8	2,7	465,4	55,1	1,5
Круглое	III	N 55.35275 E 49.18661	1,5	0,8	1,3	12,2	50,1	88,3
Сайкуль	III	N 55.37781 E 49.20007	5,8	0,6	1	33,2	98,7	53,6
Старое	III	N 55.37987 E 49.17360	10,6	1,5	2,9	158,9	25,0	0,1
Чебаркуль	III	N 55.35791 E 49.18963	22,9	1,1	2,7	257,6	24,8	47,5
III надпойменная терраса								
Грязное	I	N 55.30404 E 49.35221	0,2	0,7	0,7	1,3	100	93,1
Лесное	I	N 55.29233 E 49.31677	0,6	0,8	1,2	4,6	89,8	34,7
Моховое	II	N 55.35476 E 49.25188	1,9	3,6	8,2	69,9	13,7	56,4
Саралинское	IV	N 55.34138 E 49.26128	1,1	0,8	1,5	8,7	82,8	0,1
Утиное	I	N 55.32402 E 49.29070	0,7	0,4	0,5	2,8	100	23,7

Примечание. * I – суффозионно-карстовые; II – карстовые; III – отчлененные заливы; IV – искусственные (копани).

Водоёмы III надпойменной террасы по генезису относятся к суффозионно-карстовым (Грязное, Лесное, Утиное), карстовым (Моховое) и искусственным (Саралинское) озерам. Их площадь варьирует от 0,2 до 1,9 га.

В соответствии с классификацией В.Г. Папченкова [12] исследуемые водоёмы по степени зарастания можно отнести к следующим категориям (рис. 2):

а) незаросшие или почти незаросшие (площадь зарастания < 1 % от площади акватории) – Саралинское, Старое;

б) очень слабо заросшие (1–5 %) – Карташихинское;

- в) умеренно заросшие (11–25 %) – Байкуль, Волжское, Утиное;
- г) сильно заросшие (41–65 %) – Лесное, Чебаркуль, Сайкуль, Моховое;
- д) очень сильно заросшие (66–95 %) – Круглое, Ближнее, Медовое.

Выделяется группа из пяти озер (Утиное, Грязное, Ближнее, Медовое, Сайкуль), где мелководья занимают бóльшую часть акватории и присутствуют идеальные условия для распространения воздушно-водной растительности. Отмечаемые различия в величине зарастания озер обусловлены структурой рельефа дна: суффозионно-карстовые озера характеризуются долей мелководий, достигающих 90–100 % от общей площади акватории, в озёрах – отчлененных заливах она снижается до 20–55 % (исключение – оз. Старое), а в карстовом оз. Моховое не превышает 15 %. Однако и среди генетически близких озер можно заметить существенные различия в величине зарастания.

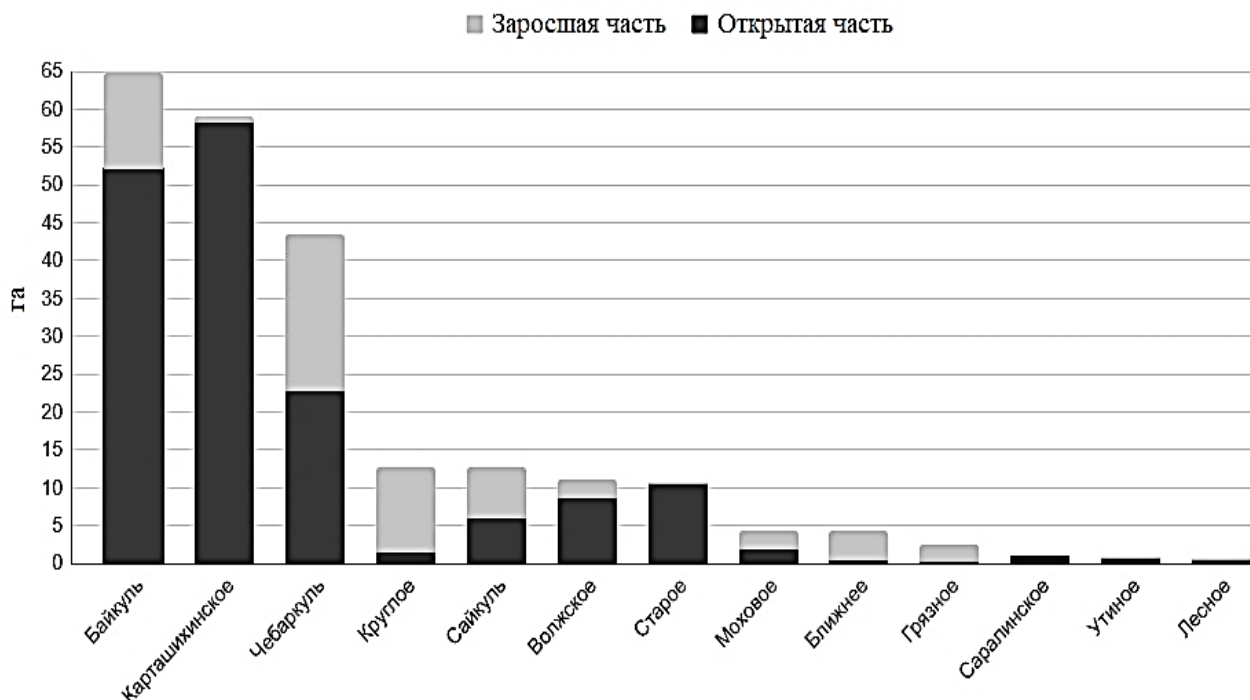


Рис. 2. Степень зарастания относительно акватории озер
 / Fig. 2. Degree of overgrowth relative to the water area of lakes

В мелководных водоемах, где средняя глубина не превышает 2 м, процессы зарастания протекают наиболее интенсивно, что ведет к накоплению на дне озер органических осадков и постепенному их заболачиванию. Доля мелководий (>50 % акватории) у 64 % исследованных нами озер объясняет их высокую уязвимость к зарастанию. Известно, что на зарастание озер оказывают влияние донные отложения и гидрохимия воды. Изменение химического состава водоёмов может способствовать развитию водной растительности, что приводит к заилению и зарастанию [13–15].

Донные отложения исследованных озер сложены песками (Круглое), илистыми песками (Карташинское, Старое), песчанистыми (Байкуль, Сайкуль, Чебаркуль, Грязное, Лесное) и глинистыми (Ближнее, Волжское, Утиное, Моховое, Саралинское) илами (табл. 2).

Минимальное содержание пелитовых частиц характерно для оз. Круглое. Оно изначально представляло собой волжский залив (понижение рельефа на материке, заполненное водой). В весеннее половодье на дне откладывались пески, а со временем образование песчаной косы привело к утрате сообщения с р. Волга, что обусловило образование новых водных объектов – отчлененных заливов. Наиболее тяжелый гранулометрический состав донных отложений отмечается у оз. Моховое, что подтверждается увеличением глинистых фракций в сравнении с остальными озерами. Очевидно, это связано со структурой тонкого детрита донных отложений, диапазон частиц которых, в зависимости о степени деградации органического вещества, составляет 0,05–0,001 мм [15].

Таблица 2 / Table 2

Физико-химические свойства донных отложений озер, %
/ Physical and chemical properties of lake bottom sediments, %

Озеро	N	P	pH	Гранулометрический состав, мм						
				1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01
Байкуль	0,03	0,03	6,3	0,3	81,3	6,9	2,8	5,0	3,7	11,5
Ближнее	0,18	0,25	6,6		43,3	25,8	1,6	12,4	16,9	30,9
Волжское	0,10	0,23	6,7		20,8	43,0	8,9	11,4	15,9	36,2
Карташи-хинское	0,03	0,01	6,8	6,6	87,0	1,5	0,9	3,8	0,3	5,0
Круглое	0,02	0,05	5,1	7,0	86,5	2,2	0,1	4,2	0,1	4,3
Сайкуль	0,11	0,02	5,4		21,3	50,8	10,3	6,6	11,0	27,9
Старое	0,03	0,01	6,8	5,6	88,2	0,7	1,1	4,0	0,5	5,6
Чебаркуль	0,02	0,07	5,5	0,6	67,3	17,6	2,8	6,7	5,0	14,5
Грязное	0,44	0,32	6,1	0,3	50,6	31,2	5,4	4,2	8,4	17,9
Лесное	0,18	0,11	5,5		41,4	46,5	2,2	7,5	2,4	12,1
Моховое	0,16	0,01	5,2		10,0	45,2	14,6	18,7	11,6	44,8
Саралинское	0,15	0,02	5,6		38,1	30,9	10,3	14,4	6,2	30,9
Утиное	0,16	0,01	5,7		8,9	53,7	9,8	16,4	11,2	37,4

Реакция среды донных отложений варьирует от кислой до близкой к нейтральной. Наиболее кислые донные отложения отмечаются в озерах с большим процентом зарастания, что обусловлено накоплением органической массы и образованием органических кислот в результате процессов разложения (табл. 2).

Донные отложения озер обогащены валовой формой азота, тогда как содержание валового фосфора в 77 % случаев характеризуется как низкое. Указанная диспропорция объясняется особенностями поступления фосфора в заповедных условиях, где его основным источником поступления являются выпадающие осадки. Тогда как в условиях антропогенной нагрузки доля суммарного поступления от сельскохозяйственных источников по фосфору может достигать 90 % [8].

С помощью факторного анализа были выявлены гидрохимические показатели, оказывающие влияние на степень зарастания озер (рис. 3).

В результате факторного анализа (метод главных компонент, варимакс-нормализованное вращение) выделены два ортогональных фактора. Первый фактор интерпретирован как фактор минерализации и эвтрофикации, объединивший взаимосвязанные параметры, стимулирующие зарастание озера: электропроводность, жесткость, содержание фосфата, кальция, сухого остатка, гидрокарбонатов, хлоридов, фенола, взвешенных веществ, а также химического потребления кислорода (ХПК) и концентрацию растворенного кислорода. Высокие нагрузки данных показателей (>0,7) свидетельствуют о едином процессе, в ходе которого увеличение биогенных элементов (фосфаты) и органического вещества, что показывает высокий уровень (ХПК), на фоне высокой минерализации приводит к интенсификации развития водной растительности и, как следствие, к изменению кислородного режима.

Второй фактор охарактеризован как литоральный, поскольку в него вошли параметры, типичные для прибрежной зоны: pH, анионные ПАВ, сульфаты, нитриты, аммоний и БПК₅. Данная совокупность отражает специфику антропогенного и биогеохимического воздействия в литорали.

Зарастание озер может объяснять сопутствующие изменения некоторых показателей: снижение pH и повышение содержания сульфатов, которые, в свою очередь, связаны с жесткостью воды. Тем не менее взаимосвязь между этими параметрами может быть и более сложной.

В литоральной зоне озер создаются благоприятные условия для разложения органического вещества, что приводит к накоплению аммонийного азота, который в ходе последующего окисления (нитрификации) преобразуется в нитриты и, как следствие, к повышенному содержанию этих ионов.

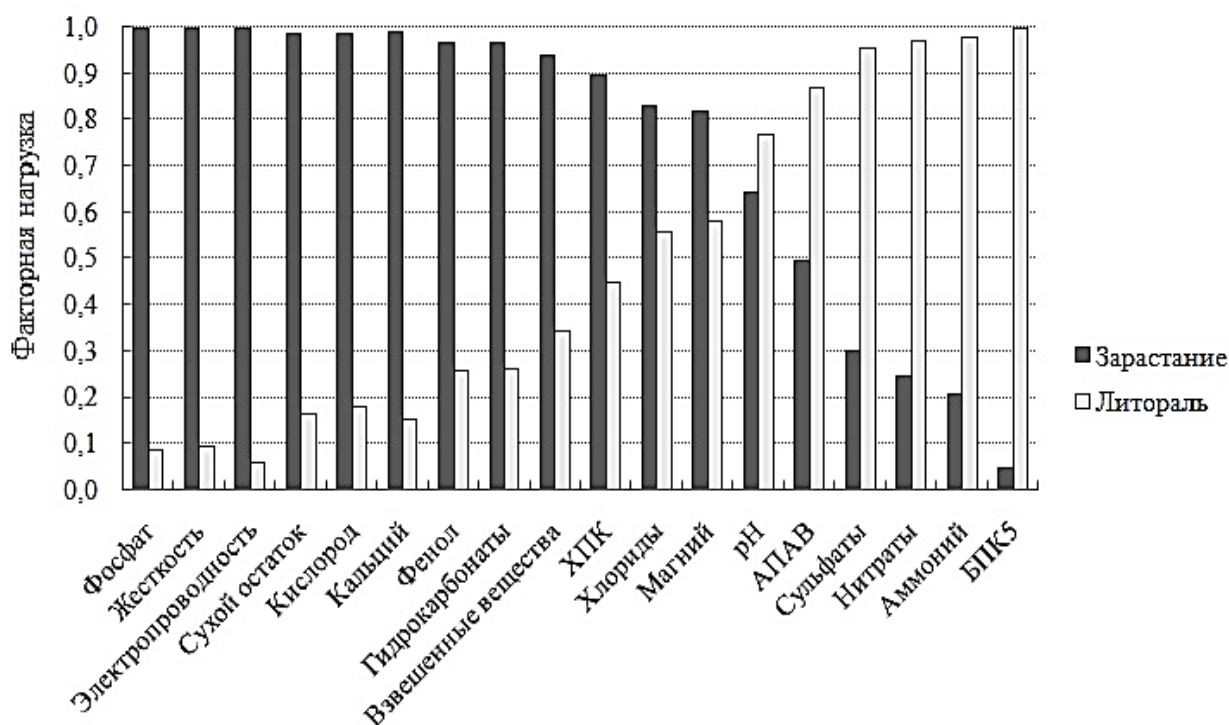


Рис. 3. Диаграмма распределения факторных нагрузок гидрохимических показателей озер / Fig. 2. Diagram showing the distribution of factor loads for hydrochemical indicators of lakes

Результаты корреляционного анализа выявили значимые взаимосвязи между степенью зарастания литоральной зоны и аккумуляцией биогенных элементов. Выявленная положительная корреляция наблюдается между площадью литоральной зоны и содержанием валового азота в донных отложениях ($r = 0,77$; $p < 0,05$), что свидетельствует о важной роли мелководных участков в процессах биогенной аккумуляции (рис. 4).

Пологий рельеф литорали с обширными мелководьями способствует активному зарастанию этой зоны. Разложение и захоронение растительных остатков ведет к накоплению в донных отложениях органического вещества и азота, что, в свою очередь, стимулирует дальнейшее расширение зоны зарастания, формируя таким образом циклический процесс.

В озерах доминируют два вида прибрежно-водной растительности: тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) и рогоз узколистный (*Typha angustifolia*). Они демонстрируют выраженную избирательность в отношении гранулометрического состава донных отложений.

Тростник преимущественно занимает песчаные грунты, тогда как рогоз явно тяготеет к илистым отложениям, что статистически подтверждается высокими значениями корреляции с содержанием фракции 0,005–0,001 мм ($r = 0,82$, $p < 0,05$) и фракции 0,05–0,01 мм ($r = 0,61$, $p < 0,05$), фракции $< 0,001$ мм ($r = 0,61$, $p < 0,05$) и долей фракций $< 0,01$ мм в донных отложениях ($r = 0,72$, $p < 0,05$). Для тростника характерна агрессивная конкурентная стратегия, направленная на подавление других видов, тогда как рогоз не проявляет подобной активности.

Выявлена положительная корреляция между степенью зарастания озёр и содержанием аммонийного азота в воде ($r = 0,61$; $p < 0,05$) (рис. 5) и отрицательная – между ХПК и площадью акватории водоемов ($r = -0,69$; $p < 0,05$) (рис. 6).

Установлено, что основной тенденцией для большинства исследованных озёр является подкисление донных отложений по мере их зарастания, обусловленное интенсификацией аэробных окислительных процессов (нитрификации и окисления сульфидов) (рис. 7). В то же время в сильно заросших озерах (5-я категория по классификации Папченкова) отмечается статистически значимый рост показателя pH донных отложений ($r = 0,71$; $p < 0,05$), что, вероятно, связано с интенсивным накоплением органического вещества и развитием в донных отложениях процессов сульфатредукции и денитрификации, приводящих к подщелачиванию среды.

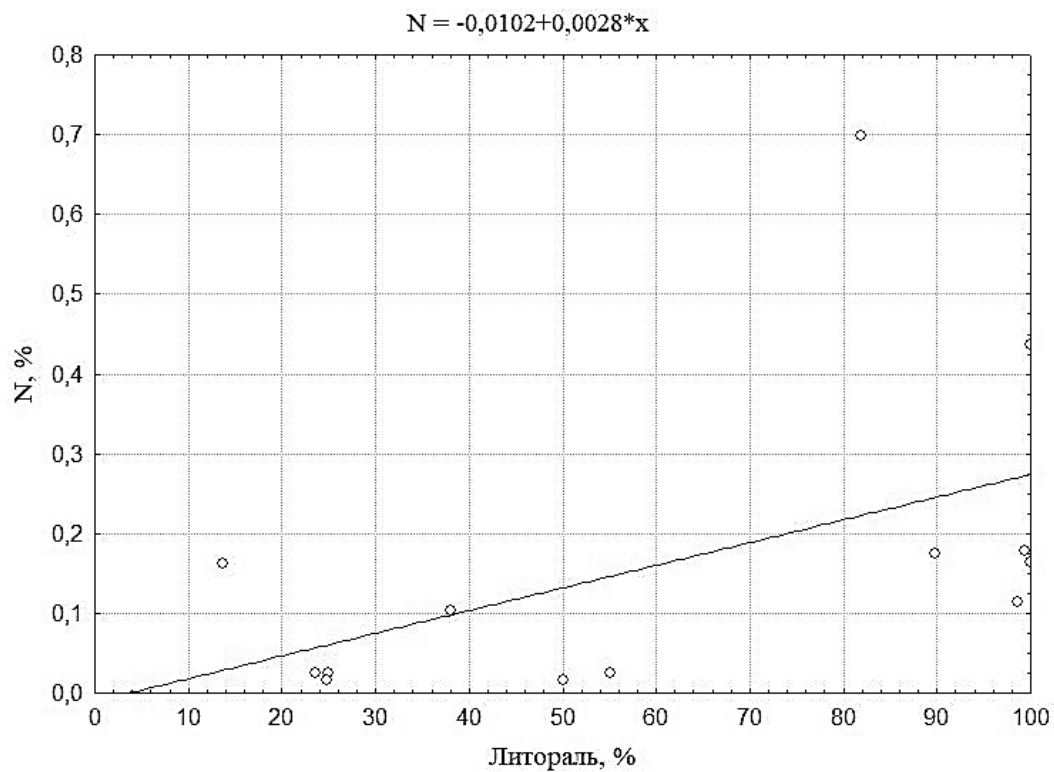


Рис. 4. Накопление валовых форм азота в донных отложениях литорали озер
/ Fig. 4. Accumulation of gross forms of nitrogen in bottom sediments of lake littoral zones

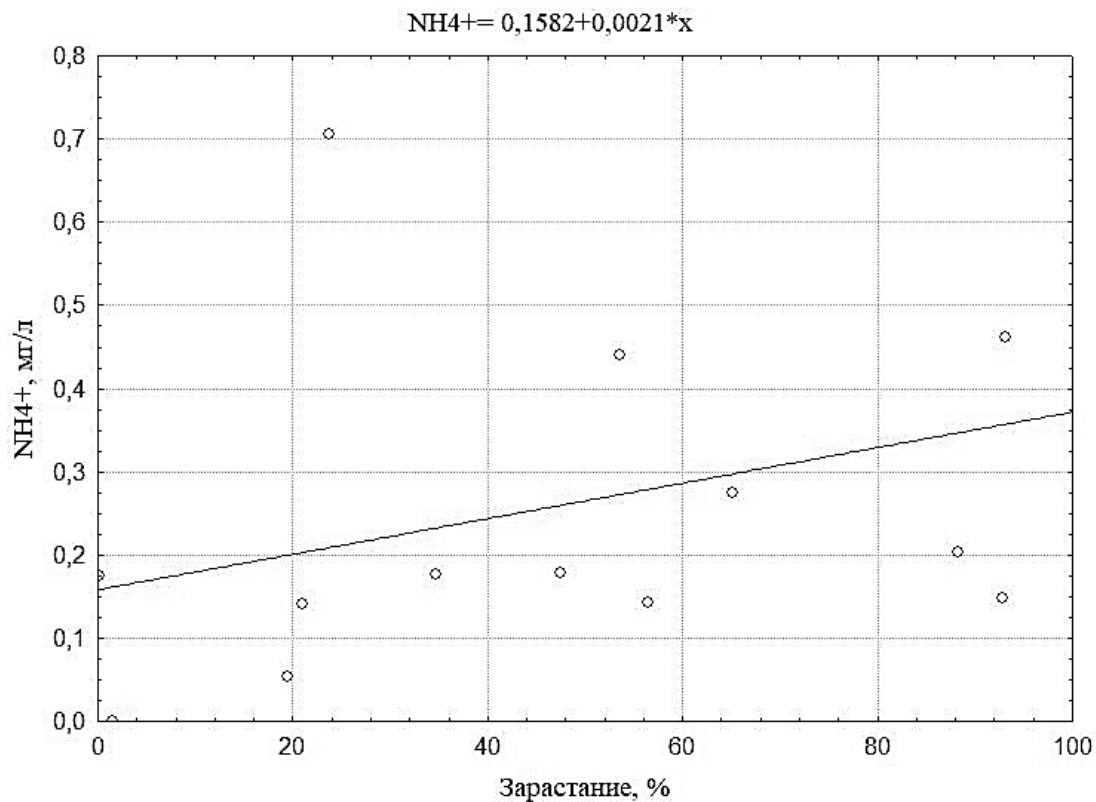


Рис. 5. Накопление аммонийной формы азота в воде в зависимости от степени зарастания озер
/ Fig. 5. Accumulation of ammonium nitrogen in water depending on the degree of lake overgrowth

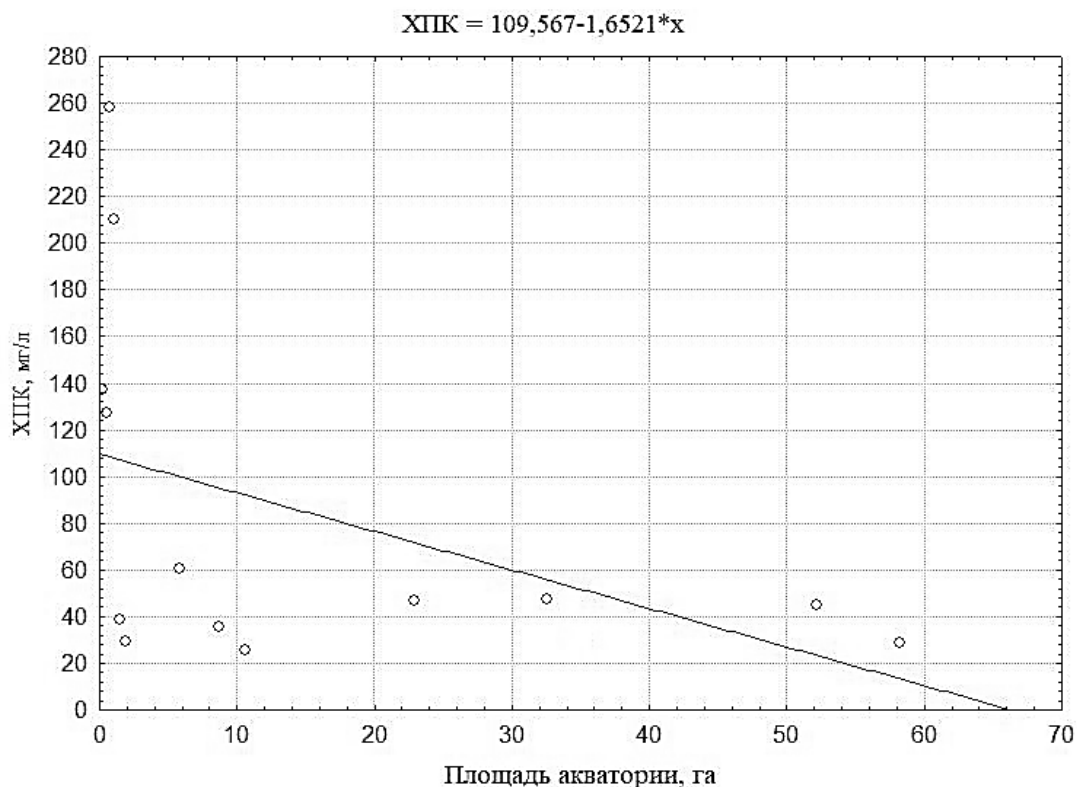


Рис. 6. Химическое потребление кислорода в озерах с различной площадью акватории
/ Fig. 6. Chemical oxygen demand in lakes with different water areas

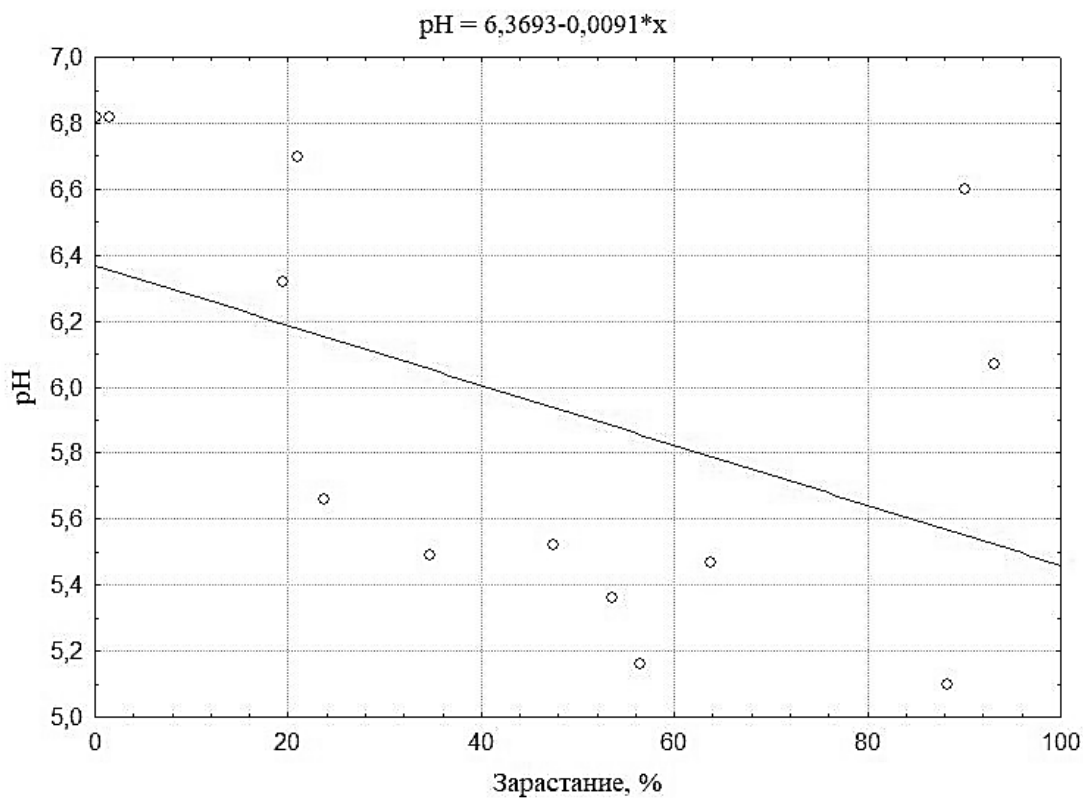


Рис. 7. Увеличение кислотности донных отложений в зависимости от степени зарастания озер
/ Fig. 7. Increase in the acidity of bottom sediments depending on the degree of lake overgrowth

Заключение

Комплексное влияние абиотических факторов на зарастание озер подтверждает необходимость интегративного подхода при оценке состояния водных экосистем. Мелководность, высокая доля литорали и преобладание илистых грунтов создают условия для ускоренной сукцессии и эвтрофикации. Установлены значимые связи между площадью литорали, накоплением органики и азота, а также зависимость распределения растительности от типа грунта. Крупные водоемы менее подвержены накоплению загрязняющих веществ, тогда как мелководные быстрее эвтрофицируются.

Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования трансформации аналогичных водоемов в условиях климатических изменений.

Список источников

1. Авакян А.Б., Широков В.М. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Минск: Университетское, 1990. 240 с.
2. Basu B.K., Kalff J., Pinel-Alloul B. The influence of macrophyte beds on plankton communities and their export from fluvial lakes in the St Lawrence River // *Freshwater Biol.* 2000. Vol. 45, № 4. P. 373–382. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2000.00635.x>
3. Lucena-Moya P., Duggan I.C. Macrophyte architecture affects the abundance and diversity of littoral microfauna // *Aquat. Ecol.* 2011. Vol. 45, № 2. P. 279–287. EDN: NUFKQD. <https://doi.org/10.1007/s10452-011-9353-0>
4. Protasov A.A. River and lake continua: An attempt at analysis and synthesis // *Inland Water Biology.* 2008. Vol. 1, № 2. P. 105–113. EDN: ZVKXGH. <https://doi.org/10.1134/s1995082908020016>
5. Raspopov I.M., Adamec L., Husák S. Influence of aquatic macrophytes on the littoral zone habitats of the lake Ladoga, NW Russia // *Preslia.* 2002. Vol. 74, № 4. P. 315–321. EDN: LHPFOR.
6. Распопов И.М. Высшие водные растения как структурообразующий фактор в развитии гидробиоценозов // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 242–245.
7. Гельфан А.Н., Гусев Е.М., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю. Г., Насонова О.Н., Миллионщикова Т.Д., Фролова Н.Л. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в XXI веке // *Водные ресурсы.* 2022. Т. 49, № 3. С. 270–285. EDN: FBVYFJJ. <https://doi.org/10.31857/S0321059622030051>
8. Руднева И.И., Чабан В.В., Шайдаев В.Г., Корепанов А.Л. Влияние природных и антропогенных факторов на сезонную экогидрологическую динамику восточного бассейна гиперсоленого Сакского озера (Республика Крым) // *Водные ресурсы.* 2023. Т. 50, № 1. С. 103–212. EDN: EDWXGP. <https://doi.org/10.31857/S0321059623010133>
9. Зиганин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Генезис и морфометрическая характеристика озер охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // *Рос. журн. прикл. экологии.* 2021. № 1. С. 36–43. EDN: UEZCLZ. <https://doi.org/10.24411/2411-7374-2020-10039>
10. Зиганин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Осадконакопление в озерах охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // *Рос. журн. прикладной экологии.* 2021. № 2. С. 47–52. EDN: JOGGVJ. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.2.47.52>
11. Зиганин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Кочетков Д.А. Генезис и морфометрические особенности отчлененных заливов Казанского района переменного подпора Куйбышевского водохранилища // *Рос. журн. прикл. экологии.* 2024. № 4. С. 10–17. EDN: ZVAGRK. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.4.10.17>
12. Патченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ; 2001. 214 с. EDN: SFYDZT
13. Зиганин И.И., Иванов Д.В., Валиев В.С., Александрова А.Б., Хасанов Р.Р., Шамаев Д.Е., Паймикина Э.Е., Маланин В.В., Марасов А.А. Характеристика донных отложений особо охраняемых озер Волго-Мёшинского междуречья // *Рос. журн. прикл. экологии.* 2020. № 3. С. 9–16. EDN: NOLLBO
14. Руфова А.А., Ксенофونتова М.И. Гидрохимический состав как один из индикаторов современных условий формирования озер (на примере г. Якутска) // *Наука и образование.* 2015. № 2. С. 144–150. EDN: VWOMYV
15. Иванов Д.В., Осмелкин Е.В., Зиганин И.И. Пространственные закономерности накопления углерода, азота и фосфора в донных отложениях озер Чувашской Республики // *Тр. Карельского науч. центра РАН.* 2021. № 4. С. 108–118. EDN: RBYCAA. <https://doi.org/10.17076/lim1402>

References

1. Avakyan A.B., Shirokov V.M. *Comprehensive use and protection of water resources.* Minsk: University Press; 1990. 240 p. (In Russ.).

2. Basu B.K., Kalff J., Pinel-Alloul B. The influence of macrophyte beds on plankton communities and their export from fluvial lakes in the St Lawrence River. *Freshwater Biol.* 2000;45(4):373-382. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2000.00635.x>
3. Lucena-Moya P., Duggan I.C. Macrophyte architecture affects the abundance and diversity of littoral microfauna. *Aquat. Ecol.* 2011;45(2):279-287. EDN: NUFKQD. <https://doi.org/10.1007/s10452-011-9353-0>
4. Protasov A.A. River and lake continua: An attempt at analysis and synthesis. *Inland Water Biology.* 2008;1(2):105-113. EDN: ZVKXGH. <https://doi.org/10.1134/s1995082908020016>
5. Raspopov I.M., Adamec L., Husák S. Influence of aquatic macrophytes on the littoral zone habitats of the lake Ladoga, NW Russia. *Preslia.* 2002;74(4):315-321. EDN: LHPFOR.
6. Raspopov I.M. Higher aquatic plants as a structuring factor in the development of hydrobiocenoses. *Lake Ladoga: past, present, future.* St. Petersburg: Science; 2002:242-245. (In Russ.).
7. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. River flow in Russia under current and projected climate change: a review of publications. 2. The impact of climate change on the water regime of Russian rivers in the 21st century. *Water Resources.* 2022;49(3):270-285. (In Russ.). EDN: FBYFJJ. <https://doi.org/10.31857/S0321059622030051>
8. Rudneva I.I., Chaban V.V., Shaidas V.G., Korepanov A.L. The influence of natural and anthropogenic factors on the seasonal ecohydrological dynamics of the eastern basin of the hypersaline Lake Saki (Republic of Crimea). *Water Resources.* 2023;50(1):103-212. (In Russ.). EDN: EDWXGP. <https://doi.org/10.31857/S0321059623010133>
9. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R. Genesis and morphometric characteristics of lakes in the protected area of the Saralinsky section of the Volga-Kama Reserve. *Russian J. of Applied Ecology.* 2021;(1):36-43. (In Russ.). EDN: UEZCLZ. <https://doi.org/10.24411/2411-7374-2020-10039>
10. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R. Sedimentation in the lakes of the protected area of the Saralinsky section of the Volga-Kama Reserve. *Russian J. of Applied Ecology.* 2021;(2):47-52. (In Russ.). EDN: JOGGVJ. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.2.47.52>
11. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Khasanov R.R., Kochetkov D.A. Genesis and morphometric features of separated bays in the Kazan area of variable backwater of the Kuibyshev Reservoir. *Russian J. of Applied Ecology.* 2024;(4):10-17. (In Russ.). EDN: ZVAGRK. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.4.10.17>
12. Papchenkov V.G. *Vegetation cover of water bodies and watercourses in the Middle Volga region.* Yaroslavl: International Academy of Business and New Technologies Press; 2001. 214 p. (In Russ.). EDN: SFYDZT.
13. Ziganshin I.I., Ivanov D.V., Valiev V.S., Aleksandrova A.B., Khasanov R.R., Shamaev D.E., Paimikina E.E., Malanin V.V., Marasov A.A. Characteristics of bottom sediments in specially protected lakes of the Volga-Myshinsky interfluvium. *Russian J. of Applied Ecology.* 2020;(3):9-16. (In Russ.). EDN: NOLLBO.
14. Rufova A.A., Ksenofontova M.I. Hydrochemical composition as one of the indicators of modern lake formation conditions (using the example of Yakutsk). *Science and Education.* 2015;(2):144-150. (In Russ.). EDN: VWOMYV.
15. Ivanov D.V., Osmelkin E.V., Ziganshin I.I. Spatial patterns of carbon, nitrogen, and phosphorus accumulation in bottom sediments of lakes in the Chuvash Republic. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences.* 2021;(4):108-118. (In Russ.). EDN: RBYCAA. <https://doi.org/10.17076/lim1402>

Информация об авторах

Ирек Ильгизарович Зиганшин – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии ИПЭН АН РТ.

Дмитрий Владимирович Иванов – доктор географических наук, заместитель директора по научной работе ИПЭН АН РТ.

Асель Билялова Александрова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии, ИПЭН АН РТ.

Всеволод Сергеевич Валиев – старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии ИПЭН АН РТ.

Рустам Равилевич Хасанов – научный сотрудник лаборатории биогеохимии ИПЭН АН РТ.

Information about the authors

Irek I. Ziganshin – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry, RPEMW.

Dmitry V. Ivanov – Doctor of Science (Geography), Deputy Director for Research, RPEMW.

Asel B. Alexandrova – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry, RPEMW.

Vsevolod S. Valiev – Senior Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry, RPEMW.

Rustam R. Khasanov – Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry, RPEMW.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 04.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.

The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 04.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 581.93+638.165/.166(571.150)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-83-93>

МЕДОНОСНЫЕ РАСТЕНИЯ ПРЕДГОРНЫХ РАЙОНОВ АЛТАЙСКОГО КРАЯ: ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ МЕДА

Галина Ильинична Ненашева¹, Татьяна Михайловна Копытина²,
Юлия Вячеславовна Козырева³✉, Анна Евгеньевна Минакова⁴

^{1, 3, 4} Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

² Южно-Сибирский ботанический сад, Барнаул, Россия

¹ nenasheva@mc.asu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2900-1253>

² kopytina@bio.asu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8947-4787>

³ kozyreva@geo.asu.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-6850-3331>

⁴ minakova_ae@geo.asu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2573-9650>

Аннотация. Исследование направлено на изучение таксономического состава медоносных растений Алтайского края, их роли во флоре региона и значимости для определения географического происхождения меда. Цель работы – выявление диагностических таксонов медоносов путем анализа палинологических спектров местных медовых образцов. Особое внимание уделено медоносной растительности горных и предгорных районов для оценки биоресурсного потенциала территории. Во флоре Алтайского края выявлено 740 видов дикорастущих медоносов (32,8 % от общей флоры), из которых 124 вида являются пыльценосными, а 616 – нектароносно-пыльценосными. Наиболее представительные семейства включают Asteraceae, Rosaceae и Fabaceae. К крупнейшим родам пыльценосов относятся *Artemisia* и *Rumex*, а среди нектароносно-пыльценосных видов доминируют *Allium*, *Salix* и *Ranunculus*. Сравнение пыльцевых спектров гречишного, дягилевого и лугового медов позволило установить соотношение ботанических таксонов в различных районах медосбора. Результаты подчеркивают перспективность развития пчеловодства и сельского туризма в регионе. Выявление маркерных видов медоносов способствует определению географического происхождения меда, что важно для повышения конкурентоспособности местной продукции и устойчивого развития региона.

Ключевые слова: медоносы, нектароносные и пыльцевидные виды, палинологические спектры, Алтайский край, географическое происхождение, маркерные виды

Для цитирования: Ненашева Г.И., Копытина Т.М., Козырева Ю.В., Минакова А.Е. Медоносные растения предгорных районов Алтайского края: возможности определения географического происхождения меда // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 83–93. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-83-93>

Благодарности: благодарим за помощь в сборе материалов для исследования Д.А. Карташову, М.С. Иванову.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, номер проекта 17-45 220334 «Спецификация медоносной базы для развития пчеловодства в Алтайском крае».

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

Original article

HONEY-BEARING PLANTS OF MOUNTAINOUS AREAS OF THE ALTAI TERRITORY: POSSIBILITIES OF DETERMINING THE GEOGRAPHICAL ORIGIN OF HONEY

Galina I. Nenasheva¹, Tatyana M. Kopytina², Yulia V. Kozyreva^{3✉}, Anna E. Minakova⁴

^{1, 3, 4} Altai State University, Barnaul, Russia

² South Siberian Botanical Garden, Barnaul, Russia

¹ nenasheva@mc.asu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2900-1253>

² kopytina@bio.asu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8947-4787>

³ kozyreva@geo.asu.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0001-6850-3331>

⁴ minakova_ae@geo.asu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2573-9650>

Abstract. The research is aimed at studying the taxonomic composition of honey-bearing plants of the Altai Krai, their role in the flora of the region and their significance for determining the geographical origin of honey. The aim of the work is to identify diagnostic taxa of honey-bearing plants by analysing palynological spectra of local honey samples. Special attention is paid to honey-bearing vegetation of mountainous and foothill areas to assess the bioresource potential of the territory. In the flora of Altai Krai 740 species of wild honey-bearing plants (32.8 % of the total flora) have been identified, of which 124 species are pollen-bearing, and 616 are nectar-bearing and pollen-bearing. The most representative families include Asteraceae, Rosaceae and Fabaceae. The largest pollen-bearing genera are *Artemisia* and *Rumex*, while *Allium*, *Salix* and *Ranunculus* dominate among nectar-bearing pollen-bearing species. Comparison of pollen spectra of buckwheat, angelica and meadow honeys allowed to establish the ratio of botanical taxa in different honey-growing areas. The results emphasise the prospects of beekeeping and rural tourism development in the region. The identification of marker species of melliferous honeys helps to determine the geographical origin of honey, which is important for increasing the competitiveness of local products and sustainable development of the region.

Keywords: mellifers, nectar-bearing and pollen-bearing species, palynological spectra, Altai Krai, geographical origin, marker species

For citation Nenasheva G.I., Kopytina T.M., Kozyreva Yu.V., Minakova A.E. Honey-Bearing Plants of Mountainous Areas of the Altai Territory: Possibilities of Determining the Geographical Origin of Honey. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):83-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-83-93>

Acknowledgments: We thank D.A. Kartashov, M.S. Ivanov for their help in collecting materials for the study. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research grant project number 17-45 220334 “Specification of a honey base for the development of beekeeping in the Altai Territory”.

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

Введение

В рамках гранта РФФИ № 17-45 220334 «Спецификация медоносной базы для развития пчеловодства в Алтайском крае» были получены результаты, которые позволили дать оценку современному состоянию медоносных растений. Изучение и анализ продукции из меда указывают на разнообразие особенностей территории, позволяющее определять ее экологическую чистоту, а медовую продукцию относить к органически чистой. Это особенно важно для развития изучаемой территории как перспективной дестинации для сельского туризма. Одним из факторов, определяющих привлекательность территории, часто выступает доступность чистой продукции от местного производителя [1].

Медоносные ресурсы нарушаются под воздействием хозяйственной деятельности человека (пашни, выпас скота, лесохозяйственная деятельность), поэтому необходимо вести рациональное природопользование территорий.

Несмотря на многолетние исследования медоносных растений, еще не во всех регионах есть полноценные данные о дикорастущих видах-медоносах. Обычно перечень видов медоносных растений регионов ограничивается списком видов традиционных сельскохозяйственных посевных культур, многолетних кормовых и пастбищных трав, хотя медосбор пчелами осуществляется и с цветов видов естественной флоры, а в лесных и горных местностях – только с дикорастущих медоносов [2–4].

Территория Алтайского края характеризуется равнинными и горными ландшафтами (рис. 1). Растительный покров представлен степными, лесными, лесостепными, луговыми, болотными и горно-тундровыми типами, что отражается на видовом составе медоносов.

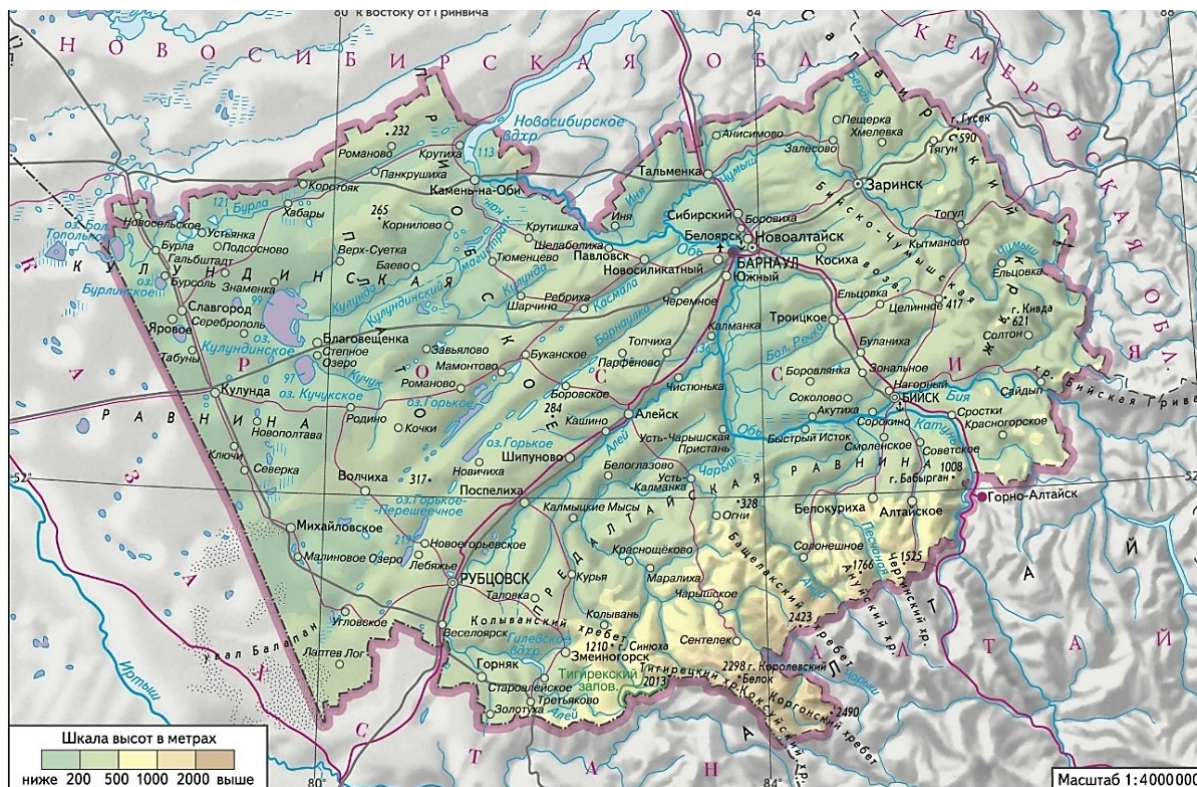


Рис. 1. Физико-географическая карта Алтайского края
/ Fig. 1. Physical and geographical map of the Altai Territory

При изучении пыльцевого состава мёда важное место уделяется установлению медоносной базы регионов России [3].

Отмечается, что «наиболее благоприятные предпосылки для развития пчелиных семей и получения высоких медосборов создаются в тех случаях, когда пасеку окружают разнообразные медоносные угодья: леса, луга, сады, поля, лесополосы с набором ценных медоносных растений. В таких местах может наблюдаться непрерывное цветение естественных и культурных медоносов в течение сезона: создается так называемый цветочно-нектарный конвейер. Медоносные угодья принято разделять на две основные категории: естественные и культурные. Естественные – это леса, луга, болота, пастбища, сенокосы, овраги, лесные вырубki, гари, прогалины» [5, с. 31]. Их потенциальная медопродуктивность составляет 71 %, а 29 % приходится на культурные угодья – посевы сельскохозяйственных растений (плодовые и ягодные насаждения, медоносные залежи). Растительность территории гарей, вырубok, редины и т.д. продуцирует 2,5 млрд кг меда – 22 % медовых запасов страны [6], 15 % общих потенциальных запасов меда в нашей стране, продуцирующих 1,7 млрд кг, приходится на посевы энтомофильных культур, занимающих 27,6 тыс. га (4 % от площадей медоносных культур в РФ) [5, 7].

Естественная флора занимает несравнимо большие площади и поэтому потенциально является более значимым ресурсом для получения меда в регионах, где выращивание медоносных сельскохозяйственных культур ограничено природными условиями, хотя обилие автохтонных растений, как и собственно нектарная продуктивность, в разных местах может значительно различаться.

Ряд исследователей [2, 3, 8] предлагают делить растения, с которых пчелы собирают нектар и/или пыльцу, на четыре группы: медоносные (нектароносные) – с них пчелы берут только нектар; нектароносно-пергааносные – с них пчелы берут главным образом нектар и в меньшей степени пыльцу; пергааносно-нектароносные – пчелы берут главным образом пыльцу и в меньшей степени нектар; пергааносные (пыльценозные) – пчелы собирают только пыльцу.

Группа пергааносных (пыльценозных) растений включает энтомофильные виды, которые не продуцируют нектар (сем. Nupharaceae (зверобойные), Papaveraceae (маковые), Ranunculaceae (лютиковые): Adonis (адонис), Anemone (ветреница), Anemonoides (ветреничка); Rosaceae (розоцветные): Agrimonia (репейничек); Asteraceae (сложноцветные): Artemisia (полынь), Ambrosia (амброзия)). К пергааносным также отнесены анемофильные (ветроопыляемые) виды (сем. Poaceae (злаки), Chenopodiaceae (маревые), Plantaginaceae (подорожниковые), родов Quercus (дуб), Betula (береза), Corylus (лещина), Pinus (сосна), Abies (пихта), Picea (ель), Larix (лиственница), Thalictrum (василистник), Carex (осока), Rumex (щавель), Cannabis (конопля), Humulus (хмель), Amaranthus (щирлица), Urtica (крапива), Turpha (рогоз)).

Цель данного исследования – выявить состав медоносных видов растений Алтайского края, показать соотношение диагностических таксонов медоносов во флоре и в палиноспектрах местных медов.

Материалы и методы

Сведения о медоносных характеристиках видов почерпнуты из многочисленных источников литературы [1–3, 8–10]. Медоносные растения собирались нами в разных типах растительных сообществ в вегетационные периоды 2015 и 2020 гг. маршрутным методом в 9 административных районах. Видовую принадлежность растений устанавливали по [11, 12].

Группа медоносных растений изучалась в сравнении со всей флорой Алтайского края. В [13] приводятся для региона сведения о 2254 видах, подвидах высших сосудистых растений, относящихся к 680 родам и 141 семейству. В общем списке флоры Алтайского края медоносные (пыльценозные, нектароносно-пыльценозные) виды растений распределены нами по соответствующим группам. Выделить нектароносные виды сложно из-за того, что пчелы, собирая нектар с таких растений, прикасаются к пыльникам и прилипшую к ним пыльцу приносят в улей, где она попадает в мёд. К пыльценосным видам растений мы отнесли те, чья пыльца входит в состав перги, хотя и встречается в небольших количествах в мёде. Это виды преимущественно ветроопыляемых (анемофильных) растений.

При анализе медоносных видов нами выявлены семейства и роды с наибольшим числом видов в группах пыльценозных, нектароносно-пыльценозных и всех медоносных растений на всей территории края. Приведены сведения о культивируемых медоносах, а также о редких видах.

Чтобы проанализировать вклад медоносных видов растений в формирование мёда, в 2012–2020 гг. нами собраны для мелиссопалинологического анализа 252 образца меда из 22 районов Алтайского края и других регионов России, из которых 2 образца – майской качки, 24 – июньской, 75 – июльской, 46 – августовской, а остальные образцы – с неустановленным временем качки. Для определения относительной частоты пыльцевых зерен в мёде готовили препараты образцов медов, отобранных по наибольшему разнообразию пыльцы медоносов. Подсчеты вели в соответствии с ГОСТ 31769-2012.

Для уточнения видовой принадлежности пыльцы в образцах мёда сравнивали ее с пыльцой, взятой с цветущих растений в природе и с собранных нами гербарных образцов. Препараты процентной пыльцы медоносных растений изготовлены по методике, описанной в справочной литературе [9–14]. Для идентификации пыльцы использовались работы [3, 9], а также фотографии пыльцы растений австрийской и адвентивной флоры из базы данных проекта PONET [15].

Результаты и обсуждение

Соотношение пыльценозных и нектароносно-пыльценозных видов растений Алтайского края представлено в табл. 1 [9].

Таблица 1 / Table 1

**Соотношение пыльценосных и нектароносно-пыльценосных видов растений
во флоре Алтайского края / The ratio of pollen-bearing and nectar-bearing
pollen-bearing plant species in the flora of the Altai Territory**

Группа растений	Количество видов / % от общего количества видов
Пыльценосные	124 / 5,5
Нектароносно-пыльценосные	616 / 27,3
Все медоносные	740 / 32,8
Все виды флоры	2254 / 100

По нашим данным [15], флора Алтайского края содержит 32,83 % (740 видов) медоносных видов растений от 2254 видов и подвидов всей флоры (табл. 1). Для качественных характеристик мёда имеет значение процентное соотношение пыльцы выявленных таксонов медоносов, наличие пыльцы редких местных видов.

В табл. 2 представлены 20 главных семейств из флоры Алтайского края, содержащих наибольшее число медоносных растений. Наиболее богатыми медоносными видами являются семейства Asteraceae (113 видов), Rosaceae (57), Fabaceae (55), Ranunculaceae (55), Lamiaceae (47), Apiaceae (31), Polygonaceae (30), Scrophulariaceae (30), Cruciferae (28), Alliaceae (26), Boraginaceae (25), Salicaceae (25), Caryophyllaceae (15), Violaceae (15).

Таблица 2 / Table 2

**Ведущие семейства медоносных видов растений Алтайского края (число видов)
/ Leading families of honey-bearing plant species of the Altai Territory (number of species)**

Ранг	Семейство	Число видов			
		П	НП	М	Всего
1	Asteraceae	32	81	113	280
2	Rosaceae	8	49	57	125
3–4	Fabaceae	0	55	55	131
3–4	Ranunculaceae	17	38	55	92
5	Lamiaceae	0	47	47	70
6	Apiaceae	0	31	31	62
7–8	Polygonaceae	15	15	30	52
7–8	Scrophulariaceae	7	23	30	76
9	Cruciferae	1	27	28	106
10	Alliaceae	0	26	26	26
11–12	Boraginaceae	0	25	25	50
11–12	Salicaceae	4	21	25	36
13–14	Caryophyllaceae	0	15	15	82
13–14	Violaceae	0	15	15	36
15	Orchidaceae	0	12	12	28
16–17	Campanulaceae	0	10	10	15
16–17	Geraniaceae	0	10	10	16
18	Malvaceae	0	9	9	12
19	Primulaceae	0	8	8	23
20	Rubiaceae	0	7	7	20

Примечание. П – пыльценосные виды; НП – нектароносно-пыльценосные виды; М – медоносные виды.

В медоносной флоре пыльценосы представлены в семействах: Asteraceae (32 вида), Ranunculaceae (17), Polygonaceae (15), Rosaceae (14), Scrophulariaceae (7), Pinaceae (6), Plantaginaceae (5), Urticaceae (5), Hypericaceae (4), Salicaceae (4), Betulaceae (3), Gentianaceae (2), Amaranthaceae (1), Berberidaceae (1), Cruciferae (1), Fagaceae (1), Limoniaceae (1). Пыльца этой группы медоносов входит в состав перги и реже встречается в мёде, тем не менее ее наличие в мелиссопалинологических спектрах может стать показателем уникальности мёда.

Ботанический состав пыльцы, входящей в мёд и пергу, отражает набор медоносных видов растений, произрастающих в растительных сообществах в месте расположения пасеки.

Наиболее крупные роды растений медоносов, содержащих 7 и более видов, представлены в табл. 3. Пыльценосами являются следующие роды: *Artemisia* (28 видов), *Rumex* (15), *Thalictrum* (7), *Potentilla* (6); по 5 видов содержат роды *Anemone*, *Papaver*, *Plantago*, *Urtica*.

Наибольшее число нектароносно-пыльценосных видов относится к родам: *Allium* (26), *Ranunculus* (25), *Salix* (21), *Viola* (15), *Vicia* (14), *Cirsium* (11), *Geranium* (10), *Lathyrus* (10), *Campanula* (9), *Centaurea* (9), *Senecio* (9), *Veronica* (9), по 7 видов – *Dactylorhiza*, *Galium*, *Primula*, *Spiraea*, по 6 видов – *Dianthus*, *Dracoccephalum*, *Limonium*, *Myosotis*, *Rosa*, *Trifolium*, по 5 видов – *Fragaria*, *Lonicera*, *Melilotus*, *Persicaria*, *Rubus*, *Sedum*. Большинство родов флоры содержит от 4 и менее видов медоносов.

Таблица 3 / Table 3

Ведущие роды медоносных видов растений во флоре Алтайского края (число видов) / Leading genera of honey-bearing plant species in the flora of the Altai Territory (number of species)

Ранг	Род	П	НП	М	Всего
1	<i>Artemisia</i>	28	0	28	28
2	<i>Allium</i>	0	26	26	26
3	<i>Ranunculus</i>	0	25	25	25
4	<i>Salix</i>	0	21	21	30
5–6	<i>Rumex</i>	15	0	15	16
5–6	<i>Viola</i>	0	15	15	36
7	<i>Vicia</i>	0	14	14	14
8	<i>Cirsium</i>	0	11	11	11
9–10	<i>Geranium</i>	0	10	10	14
9–10	<i>Lathyrus</i>	0	10	10	14
11–14	<i>Campanula</i>	0	9	9	11
11–14	<i>Centaurea</i>	0	9	9	12
11–14	<i>Senecio</i>	0	9	9	9
11–14	<i>Veronica</i>	3	6	9	23
15–19	<i>Dactylorhiza</i>	0	7	7	7
15–19	<i>Galium</i>	0	7	7	19
15–19	<i>Primula</i>	0	7	7	7
15–19	<i>Spiraea</i>	0	7	7	7
15–19	<i>Thalictrum</i>	7	0	7	7

Примечание. Жирным шрифтом выделены роды, содержащие наибольшее число видов в ботанико-географических районах.

Фактически основной медосбор осуществляется с культивируемых медоносов. Традиционно возделываемые культуры относятся также и к медоносной флоре и составляют основу монофлорных мёдов: *Helianthus annuus* L., *Fagopyrum esculentum* Moench., *Brassica napus* L., *Onobrychis arenaria* (Kit.) DC.; редко возделывают *Phacelia tanacetifolia* Benth., *Galega orientalis* Mill., *Sinapis alba* L. Также выращиваются донник, люцерна, а из бахчевых культур, относящихся к медоносам, – разные сорта арбуза, дыни, огурца и тыквы. По данным [5], в Алтайском крае 88 % мёда производится на базе сельскохозяйственных культур, характерных для многих регионов, а их пыльца непременно будет определяться в мёде из разных территорий. И только нахождение пыльцы дикорастущих видов важно в определении аутентичности мёда [16].

Многие виды-медоносы имеют широкий ареал, поэтому не могут претендовать на роль маркеров географического происхождения мёда. Показательным будет набор и процентное соотношение пыльцы медоносов разных таксономических рангов.

В качестве примера соотношения состава медоносов в растительном сообществе места нахождения пасеки и пыльцы медоносов в образцах мёда с этой пасеки приведём данные по Кытмановскому р-ну Алтайского края (рис. 2).

Образец мёда № 170/2020 (июль 2020 г.). Местонахождение пасеки: окр. с. Кытманово, в 3 км на юго-запад, разнотравно-злаковый (зопниково-кровохлебково-кострецовый) луг, правый берег

ручья. N53.438154, E85.387189. Рельеф местности – слабохолмистый, в небольших понижениях располагаются березовые колки. Берега ручья поросли ивами (*Salix*) и клёном (*Acer negundo*). В июле основной медосбор осуществлялся с поля гречихи (*Fagopyrum esculentum* Moench), расположенного северо-восточнее пасеки. На лугах произрастали нектароносно-пыльценозные виды: *Adenophora liliifolia* (L.) DC., *Centaurea scabiosa* L., *Crepis lyrata* (L.) Froel., *Origanum vulgare* L., *Phlomis tuberosa* L., *Sanguisorba officinalis* L., *Tanacetum vulgare* L., *Vicia amoena* Fisch. Вдоль дорог, на залежах произрастают сорные виды сем. Brassicaceae – *Bunias orientalis* L., *Sisymbrium* spp., *Berteroa incana* (L.) DC. и др. В 3 км от пасеки – поле основного медоноса из сем. крестоцветных – рапс (*Brassica napus* L.).

Образец мёда № 171/2020 (18 июля 2020 г.). Местонахождение пасеки: в 30 км на северо-восток от с. Мишиха, правый берег озера, злаково-разнотравный (лютиково-тысячелистниково-тимофеевково-клеверный) луг. N53.738117, E85.542398. В июле на лугу произрастали нектароносно-пыльценозные виды: *Achillea asiatica* Serg., *Berteroa incana* (L.) DC., *Centaurea jacea* L., *Hypericum perforatum* L., *Leucanthemum vulgare* Lam., *Melilotus albus* Medik, *Pastinaca sylvestris* Mill., *Ranunculus acris* L., *Trifolium pratense* L.

Ботанический состав по данным пыльцевого анализа образцов 170/2020 и 171/2020 представлен в табл. 4.

Мёд образца № 170/2020 – монофлорный (гречишный) (46,67 %) (пасека располагалась рядом с полем гречихи), с большим содержанием пыльцы Brassicaceae (31,51 % – недалеко находилось поле *Brassica napus*). Мёд образца № 171/2020 – полифлорный (луговой), с преобладанием пыльцы Fabaceae (31,63 %), Ranunculaceae (27,79 %), Asteraceae (23,99 %), что соответствует видовому составу луговых растений, произраставших рядом с пасекой.

Таблица 4 / Table 4

**Содержание пыльцы в образцах мёда из Кытмановского р-на Алтайского края, %
/ Pollen content in honey samples from the Kytman district of the Altai Territory, %**

Таксон	№ образца	
	170/2020	171/2020
Содержание пыльцы, %		
Polygonaceae, в т. ч. <i>Fagopyrum esculentum</i>	46,67	–
Brassicaceae	31,51	4,95
Fabaceae	10,74	31,63
Ranunculaceae	1,28	27,79
Asteraceae	5,72	23,99
Rosaceae	11,09	0,60
Hypericaceae	–	9,15
Lamiaceae	6,42	0,45
Liliaceae, в т. ч. Alliaceae	5,83	2,55
Caryophyllaceae	4,20	0,30
Apiaceae	1,75	3,60
*Poaceae	2,57	–
Onagraceae	0,58	–

Нами исследованы ранее образцы мёда из горных районов Алтайского края [16]. В образце № 109/2014 дягилиевого мёда из Чарышского р-на (13 июля 2014 г.) наибольшее количество пыльцы принадлежало семействам Apiaceae (59,92 %, в т. ч. *Angelica decurrens* (Ledeb.) B. Fedtsch., *A. sylvestris* L.), Cruciferae (11,98 %), Fabaceae (8,26 %) и Rosaceae (7,29 %). Присутствовали в небольших количествах пыльцевые зерна видов из семейств Valerianaceae (5,83 %), Asteraceae (4,86 %), Polygonaceae (1,62 %), Pinaceae (0,16 % – случайный занос пыльцы) и Tiliaceae (0,08 % – *Tilia cordata* Mill. массово произрастает в искусственных посадках вокруг пасеки, с которой был получен образец мёда). В образце № 142/2015 дягилиевого мёда из Солонешенского р-на (конец июля 2015 г.) идентифицирована пыльца семейств Apiaceae (76,54 %, в т. ч. *Angelica* spp.), Brassicaceae (10,26 %), Asteraceae (3,62 %), Fabaceae (3,36 %), Lamiaceae (2,86 %), Rosaceae (2,44 %), Polemoniaceae (0,50 %), Liliaceae (0,34 %) и Polygonaceae (0,08 %). В образце

№ 140/2015 дягилевого меда из Алтайского р-на (конец июля 2015 г.) соотношение пыльцы составило: *Ariaceae* (76,86 %, в т. ч. *Angelica* spp.), *Asteraceae* (10,36 %), *Rosaceae* (5,87 %) и *Brassicaceae* (6,91 %). В образце № 141/2015 разнотравного меда из Смоленского р-на (конец июля 2015 г.) соотношение пыльцы было следующим: *Brassicaceae* (36,23 %, в т.ч. *Brassica napus*), *Polygonaceae* (26,69 %, в. ч. *Fagopyrum esculentum*), *Fabaceae* (14,65 %), *Rosaceae* (8,38 %), *Asteraceae* (6,84 %), *Ranunculaceae* (6,45 %), *Ariaceae* (0,48 %), *Boraginaceae* (0,28 %) [10].

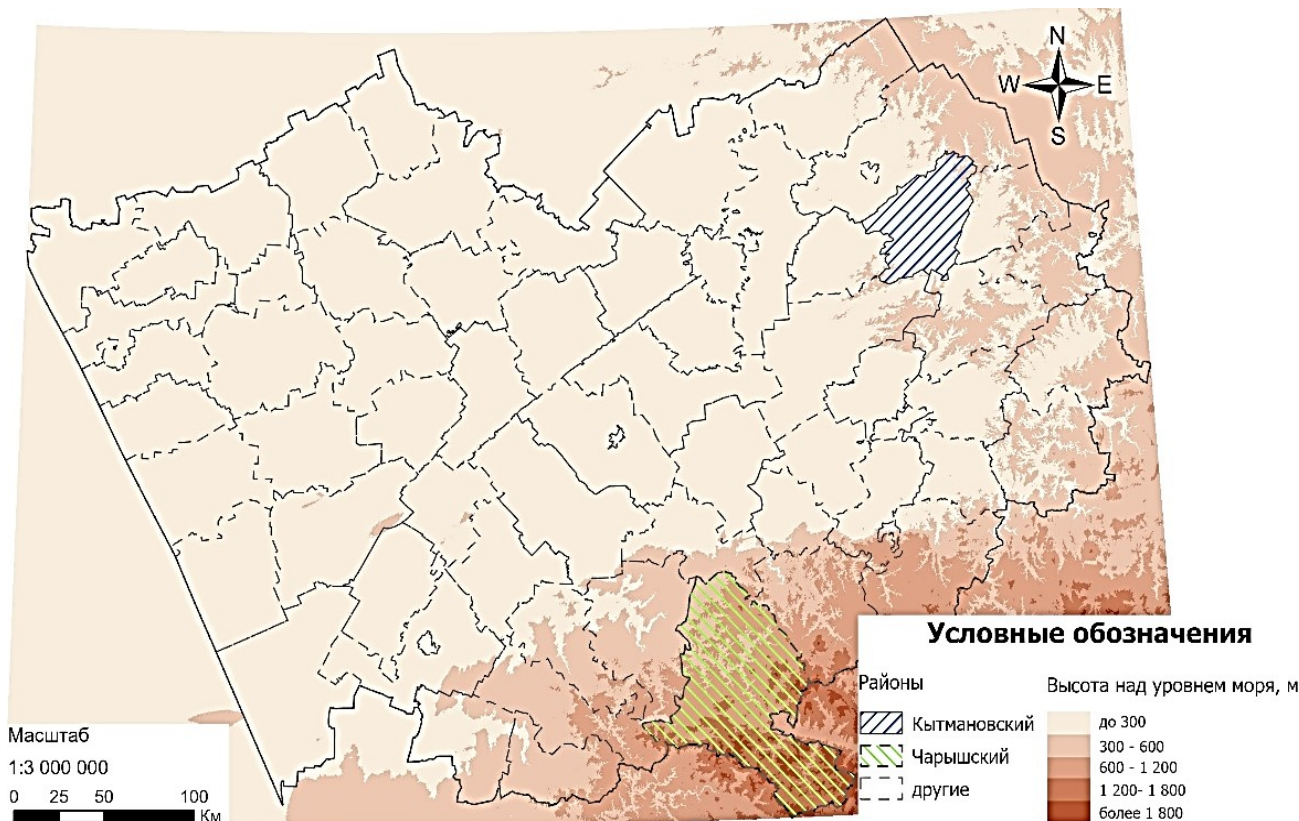


Рис. 2. Расположение Кытмановского и Чарышского районов на карте высот Алтайского края
 / Fig. 2. Location of the Kytmanovsky and Charyshsky districts on the map of the heights of of the Altai Territory

Образец № 221/2020 (июльская качка), местонахождение пасеки: Алтайский край, Чарышский р-н, в 1,5 км на СВ от с. Красный Май, пойма р. Маралихи, 200 м вверх по р. Сургутка, смешанный лес у края поля. N51.729402, E83.437195. Пасека И.Н. Чубарова. Образец № 222/2020 (качка в конце июня), местонахождение пасеки: Алтайский край, Чарышский р-н, в 8 км на СВ от с. Маралихи, верховья р. Сургутки, восточный склон. Горностепное разнотравье, заросли караганы и дягиля. N51.696071, E83.439773. Пасека И.Н. Чубарова. Образец № 221/2020 взят на пасеке, как и описанный выше образец № 109/2014. По ботаническому составу образец № 221/2020 – дягилевый мед, в палиноспекте которого много пыльцы *Ariaceae* (74,10 % – с преобладанием *Angelica decurrens*, *A. sylvestris* L.; также в месте нахождения пасеки цветы *Snidium dahuricum* (Jacq.) Turcz. ex Fisch. et C.A. Mey., *Kitagawia baicalensis* (Redow. ex Willd.) Pimenov, *Seseli buchtormense* (Fisch. ex Spreng.) W.D.J. Koch), значительно меньше пыльцы *Brassicaceae* (9,53 %) и *Rosaceae* (8,79 %); также присутствует пыльца *Asteraceae*, *Fabaceae* (посевы *Galega orientalis* Lam.). В образце № 222/2020 преобладает пыльца *Fabaceae* (36,04 % – *Caragana arborescens* Lam., виды *Trifolium* L., *Medicago* L., *Melilotus* Hill); меньше пыльцы *Ariaceae* (22,33 % – *Angelica sylvestris*, а также *Ferula soongarica* Pall. ex Spreng., *Heracleum dissectum* Ledeb., *Seseli libanotis* (L.) W.D.J. Koch), *Asteraceae* (17,90 %); также имеется пыльца *Onagraceae*, *Valerianaceae*, *Brassicaceae*, *Lamiaceae*, *Rosaceae*, *Tilia cordata* (посадки). Этот мёд полифлорный, условно его можно назвать цветочным, или луговым. Отличительная особенность обоих образцов – наличие в них пыльцы *Boraginaceae* (вероятно, *Echium vulgare*, *Nonea rossica*, *Onosma simplicissima* и др.).

Результаты мелиссопалинологического анализа образцов мёда, собранных нами на территории Алтайского края, мы сравнили с данными других исследователей [10–17]. В мёде Чарышского, Алтайского, Солонешенского р-нов выявлено наличие, а в некоторых образцах – преобладание пыльцы сем. *Ariaceae* (4,6–88,6 %), в образцах из Чарышского, Солонешенского р-нов – *Fabaceae* (46,5–70,0 %), Солонешенского р-на – *Lamiaceae* (до 30 %), и во всех образцах была пыльца сем. *Asteraceae* (1,3–11,0 %) [17, 18]. Отметим, что семейственный состав пыльцы в мёде из этих районов совпадает с нашими результатами, но отличается процентное соотношение между семействами.

При выявлении географических особенностей мёда по палиноспектрам алтайских мёдов (Восточно-Казахстанская область, Республика Казахстан) установлена высокая доля пыльцы *Origanum vulgare*, массово растущего по склонам гор и холмов [2, 3, 8]. В этих видах встречается примесь пыльцы растений агроландшафтов (*Echium vulgare*, *Amoria (Trifolium) repens*). В составе отдельных проб отмечена пыльца, характеризующая географическое происхождение – *Angelica decurrens*, *Saussurea* sp. (соссурея). По результатам анализа четыре образца горноалтайского мёда из Красногорского р-на Алтайского края содержали пыльцу *Angelica decurrens*, *Filipendula ulmaria*, *Centaurea jacea*, *Echium vulgare*, *Fagopyrum esculentum*. В палиноспектрах других трех алтайских образцов из Бийского и Троицкого р-нов выявлена высокая доля (36–87 %) пыльцы гречихи посевной. По мнению авторов, это связано с тем, что в степной и лесостепной зонах Алтайского края гречиха обеспечивает получение свыше 50 % товарного мёда. В палиноспектрах мёда из Бийского р-на Алтайского края доминировала пыльцы *Brassica napus*, *Melilotus* sp., *Lotus corniculatus*.

Заключение

Перспективным для районов Алтайского края является развитие сельского туризма и возросший интерес к качеству пищевых продуктов, наиболее важной из которых – мёд. Наличие чистой медовой продукции местного производства играет одну из ведущих ролей в развитии региона. Выявление медоносных видов растений региона в большой мере способствует расширению списка маркерных видов, а нахождение их пыльцы в мёде – основание для установления его географического происхождения. Многие виды-медоносы имеют широкий ареал, поэтому не могут претендовать на роль маркеров географического происхождения мёда. К показателям относятся набор и процентное соотношение пыльцы на уровне семейств, родов, видов медоносов (особенно эндемичные виды во флорах регионов). Назрела необходимость формирования электронной базы фотографий пыльцы региональных медоносов. Она будет востребована при определении в мёде пыльцы редких видов-медоносов, характерных для исследуемой местности, и при установлении аутентичности мёда.

Список источников

1. *Ненашева Г. И.* Опыт применения мелиссопалинологического анализа при оценке туристско-рекреационного потенциала Алтайского края (на примере Чарышского района) // Вестн. Нац. академии туризма. 2020. № 2(54). С. 51–54. EDN: YCNUZE.
2. *Курманов Р. Г., Галеев Р. И.* Картографирование медоносных угодий европейской части России // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2021. № 3. С. 77–85. EDN: QOWMBK.
3. *Курманов Р. Г.* Палинологическая характеристика монофлорных мёдов Республики Башкортостан // Пчеловодство. 2019. № 6. С. 50–52. EDN: CRLFAA.
4. *Осокина А. С., Колбина Л. М.* Эколого-биологическая характеристика медоносных растений Удмуртской Республики // Агр. вестн. Урала. 2024. Т. 24, № 7. С. 896–908. EDN: PQNIAC. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-06-896-908>
5. *Кулаков В. Н.* Медоносные ресурсы субъектов Российской Федерации. М., 2013. 328 с. EDN: KBGJKR.
6. *Грязькин А. В., Парамонов С. Р., Семенова Е. И., Хоанг М. А.* Динамика видового состава медоносов на постагрогенных и лесных землях // Агр. науч. журн. 2022. № 8. С. 4–7. EDN: GUATMR. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i8pp4-7>
7. *Кулаков В. Н.* Оценка экономического эффекта трофических связей медоносных пчёл и энтомофильных растений // Глав. зоотехник. 2020. № 9. С. 50–59. EDN: HHZDSW. <https://doi.org/10.33920/sel-03-2009-06>

8. Курманов Р. Г. Органолептический и палинологический анализ меда: обзор современного состояния методик, характеристика монофлорных видов российского меда // Иннов. и продовол. безопасность. 2020. № 3. С. 19–31. EDN: XFVVCZ. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-19-31>
9. Бурмистров А. Н., Никитина А. Н., Никитина В. А. Медоносные растения и их пыльца: справочник. М.: Росагропромиздат, 1990. 192 с.
10. Ненашева Г. И., Иванова М. С., Малыгина Н. С., Копытина Т. М. Палинологическая характеристика медов Алтайского края // Укр. экол. журн. 2017. Т. 7, № 4. С. 56–64. EDN: VOKRZM.
11. Красноборов И. М., Ломоносова М. Н., Шауло Д. М. [и др.] Определитель растений Алтайского края. Новосибирск: СО РАН, ГЕО, 2003. 631 с. EDN: QKMSDF.
12. Кашина М. И., Красноборов И. М., Шауло Д. М. [и др.] Флора Сибири. Новосибирск: Наука, 1988. 200 с.
13. Силантьева М. М. Конспект флоры Алтайского края. 2-е изд. доп. и перераб. Барнаул: АлтГУ, 2013. 520 с. EDN: RYVWSH.
14. Hesse M., Halbritter H., Zetter R., Weber M., Buchner R., Frosch-Radivo A., Ulrich S. Pollen Terminology. Vienna, 2009.
15. Пыльца // Ages. URL: <https://www.ages.at/themen/umwelt/pollen/projekt-ponet/> (дата обращения: 19.10.2020).
16. Копытина Т. М., Ненашева Г. И., Иванова М. С. О флоре медоносных растений районов Северного и Северо-Западного Алтая в пределах Алтайского края // Итоги и перспективы геоботанических исследований в Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию лаборатории экологии и геоботаники ЦСБС СО РАН (Новосибирск, 13–16 мая 2019 г.). Новосибирск, 2019. С. 53–54. EDN: UIQRAF.
17. Мецерыкова Л. А. Характеристика популяции пчёл и состава мёда, полученного в горно-таёжной зоне Алтайского края // Вестн. АГАУ. 2021. № 9(203). С. 71–75. EDN: AZPGYT. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2021-203-09-71-75>
18. Мецерыкова Л. А. Породные особенности пчёл и флористический состав мёда на пасеке Калманского района Алтайского края // Вестн. АГАУ. 2018. № 6. С. 150–155. EDN: RXRSHR.

References

1. Nenasheva G.I. Experience in the application of melissopalynological analysis in assessing the tourist and recreational potential of Altai Territory (on the example of Charyshsky district). *Bulletin of the National Academy of Tourism*. 2020;(2):51-54. (In Russ.). EDN: YCNUZE.
2. Kurmanov R.G., Galeev R.I. Mapping of honey-bearing lands of the European part of Russia. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2021;(3):77-85. (In Russ.). EDN: QOWMBK.
3. Kurmanov R. G. Palynological characterization of monofloral honeys of the Republic of Bashkortostan. *Beekeeping*. 2019;(6):50-52. (In Russ.). EDN: CRLFAA.
4. Osokina A.S., Kolbina L.M. Ecological and biological characteristics of honey-bearing plants of the Udmurt Republic. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024;24(7):896-908. (In Russ.). EDN: PQNIAC. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-06-896-908>
5. Kulakov V. N. *Honey-bearing resources of the subjects of the Russian Federation*. Moscow, 2013. 328 p. (In Russ.). EDN: KBGJKR.
6. Gryazkin A.V., Paramonov S.R., Semenova E.I., Hoang M.A. Dynamics of the species composition of honeybees on postagrogenic and forest lands. *Agricultural Scientific J*. 2022;(8):4-7. (In Russ.). EDN: GUATMR. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i8pp4-7>
7. Kulakov V.N. Estimation of economic effect of trophic relationships of honey bees and entomophilous plants. *Chief Animal Technician*. 2020;(9):50-59. (In Russ.). EDN: HHZDSW. <https://doi.org/10.33920/sel-03-2009-06>
8. Kurmanov R.G. Organoleptic and palynological analysis of honey: a review of the current state of methods, characterization of monofloral species of Russian honey. *Innovative and Food Safety*. 2020;(3):19-31. (In Russ.). EDN: XFVVCZ. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-19-31>
9. Burmistrov A.N., Nikitina A. N., Nikitina V.A. *Honey-bearing plants and their pollen: reference book*. Moscow: Russian Agro-industrial Publishing House; 1990. 192 p. (In Russ.).
10. Nenasheva G.I., Ivanova M.S., Malygina N.S., Kopytina T.M. Palynological characterization of honeys of Altai Territory. *Ukrainian Ecological J*. 2017;7(4):56-64. (In Russ.). EDN: VOKRZM.
11. Krasnoborov I.M., Lomonosova M.N., Shaulo D.M. et al. *Identification of plants in the Altai Territory*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, GEO; 2003. 631 p. (In Russ.). EDN: QKMSDF.
12. Kashina M.I., Krasnoborov I.M., Shaulo D.M. et al. *Flora of Siberia*. Novosibirsk: Science; 1988. 200 p. (In Russ.).

13. Silanteva M.M. *Abstract of the Flora of the Altai Territory*. 2nd ed., exp. and revised. Barnaul: Altai State University Press; 2013. 520 p. (In Russ.). EDN: RVYWSH.
14. Hesse M., Halbritter H., Zetter R., Weber M., Buchner R., Frosch-Radivo A., Ulrich S. *Pollen Terminology*. Vienna, 2009.
15. *Pollen*. Available from: <https://www.ages.at/themen/umwelt/pollen/projekt-ponet/> [Accessed 19th October 2020].
16. Kopytina T.M., Nenasheva G.I., Ivanova M.S. On the flora of honey-bearing plants of the Northern and North-Western Altai regions within the Altai Territory. *Results and prospects of geobotanical research in Siberia: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 75th anniversary of the laboratory of ecology and geobotany of the Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, May 13-16, 2019)*. Novosibirsk, 2019:53-54. (In Russ.). EDN: UIQRAF.
17. Meshcheryakova L.A. Characterization of the bee population and honey composition obtained in the mountain taiga zone of Altai Territory. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2021;(9):71-75. (In Russ.). EDN: AZPGYT. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2021-203-09-71-75>
18. Meshcheryakova L.A. Breed features of bees and floristic composition of honey at the apiary of Kalmansky district of Altai Territory. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2018;(6):150-155. (In Russ.). EDN: RXRSHR.

Информация об авторах

Г.И. Ненашева – кандидат географических наук, доцент, заведующая кафедрой физической географии и геоинформационных систем АГУ.

Т.М. Копытина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ЮСБС.

Ю.В. Козырева – кандидат географических наук, директор Института географии, доцент кафедры физической географии и геоинформационных систем АГУ.

А.Е. Минакова – магистрант Института географии АГУ.

Information about the authors

G.I. Nenasheva – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Head of the Department of Physical Geography and Geoinformation Systems, ASU.

T.M. Kopytina – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, SSBGS.

Yu.V. Kozyreva – Candidate of Science (Geography), Director of the Institute of Geography, Associate Professor of the Department of Physical Geography and Geoinformation Systems, ASU.

A.E. Minakova – Master's Student, Institute of Geography, ASU.

Статья поступила в редакцию 19.05.2025; одобрена после рецензирования 08.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 08.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья
УДК 528.94+314.7
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-94-102>

ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РОССИЙСКИХ ГОРОДАХ

**Иван Алексеевич Соловьев¹, Юлия Федоровна Зольникова^{2✉},
Наталья Александровна Щитова³, Данил Геннадьевич Акинин⁴**
^{1, 2, 3, 4} Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия
¹ soloivan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2150-7284>
² zolnst@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0009-8216-225X>
³ stavgeo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1662-6898>
⁴ stavguide.info@yandex.ru

Аннотация. Представлены материалы, полученные в ходе изучения миграции в российских разнотипных городах. Проведен детальный анализ миграционных процессов в населенных пунктах неодинаковой плотности и функциональной направленности. Для понимания особенностей их роста за счет миграции выполнена сравнительно-географическая диагностика с использованием картографического и геоинформационного методов. Выявлены пространственные особенности протекания миграционных процессов в городах с разными позиционными преимуществами и миграционной привлекательностью в контексте действия ведущих факторов. Географические рамки исследования охватывают города европейской и азиатской частей России. Для его реализации были сформированы базы пространственных данных разного территориального уровня, в том числе и поселенческого. Сбор информации производился из открытых статистических источников Росстата и ЕМИСС. Для построения картограмм применялась геоинформационная платформа QGIS. Использовались среднегодовые показатели численности городского населения в регионах, коэффициенты миграционного прироста, сальдо миграции в городах. Исследование позволило выявить несколько основных тенденций развития миграции в населенных пунктах: долговременную устойчивую, отражающую перспективы миграционных процессов в городских агломерациях, сибирских и дальневосточных городах, городах «старого промышленного развития»; долговременную исчерпывающуюся, характеризующую направления развития республиканских столиц, и ситуационную с перспективой превращения в долгосрочную, отображающую изменения в миграционной привлекательности ресурсоориентированных городов, малых и средних городов Европейской России, региональных столиц.

Ключевые слова: миграция населения, городская местность, пространственные различия миграционных процессов, европейская часть России, азиатская часть России, типы городов

Для цитирования: Соловьев И.А., Зольникова Ю.Ф., Щитова Н.А., Акинин Д.Г. Территориальные особенности миграционных процессов в российских городах // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 94–102. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-94-102>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00057, <https://rscf.ru/project/25-27-00057/>.

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

Original article

TERRITORIAL FEATURES OF MIGRATION PROCESSES IN RUSSIAN CITIES

Ivan A. Soloviev¹, Julia F. Zolnikova²✉, Natalia A. Shchitova³, Danil G. Akinin⁴

^{1, 2, 3, 4} North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

¹ soloivan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2150-7284>

² zolnst@mail.ru✉, <https://orcid.org/0009-0009-8216-225X>

³ stavgeo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1662-6898>

⁴ stavguide.info@yandex.ru

Abstract. The article presents the materials obtained in the course of studying migration in Russian cities of different types. A detailed analysis of migration processes in cities of different population sizes and functional orientations was conducted. To understand the peculiarities of urban growth due to migration, a comparative geographical diagnostics was performed using cartographic and geoinformation methods. Spatial features of migration processes in cities with different positional advantages and migration attractiveness in the context of the action of leading factors were revealed. The geographic scope of the study covers cities of the European and Asian parts of Russia. To implement this study, spatial databases of different territorial levels, including settlement, were formed. Information was collected from open statistical sources of Rosstat and EMIS. The QGIS geoinformation platform was used to construct cartograms. Average annual indicators of the urban population in the regions, migration growth rates, and the balance of migration in cities were used. The study allowed us to identify several main trends in the development of migration in cities: long-term sustainable, reflecting the prospects for migration processes in urban agglomerations, Siberian and Far Eastern cities, cities of "old industrial development"; long-term comprehensive, characterizing the directions of development of republican capitals and situational with the prospect of turning into a long-term, reflecting changes in the migration attractiveness of resource-oriented cities; small and medium-sized cities of European Russia, regional capitals.

Keywords: population migration, urban areas, spatial differences in migration processes, European part of Russia, Asian part of Russia, types of cities

For citation Soloviev I.A., Zolnikova J.F., Shchitova N.A., Akinin D.G. Territorial Features of Migration Processes in Russian Cities. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):94-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-94-102>

Acknowledgments: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 25-27-00057, <https://rscf.ru/project/25-27-00057/>.

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

Введение

Проблема миграции населения продолжает оставаться острой и актуальной, несмотря на большое количество научных работ российских и зарубежных исследователей в этой области. Одно из значимых направлений – изучение миграционных процессов в городах. По результатам большинства исследований отмечается тенденция оттока населения из периферийных территорий, мелких населенных пунктов в административные центры, крупные города и их пригороды, что обеспечивает их рост и опережающее развитие.

Миграционные процессы в городах во многих зарубежных работах рассматриваются в рамках концепции ступенчатой миграции, а крупные города выступают верхними этажами в перемещении населения [1, 2]. Большое внимание к изучению миграции в населенных пунктах проявляют китайские ученые. Исследуются взаимосвязи между социально-экономическим статусом мигрантов и их географической мобильностью в рамках городской иерархии [3]; факторы, влияющие на намерение переселиться из одного поселения в другое [4]. Белорусский исследователь

Г.В. Ридевский отмечает, что миграция населения – главный фактор роста большинства городских агломераций, а наиболее растущей является Минская городская агломерация, в которой концентрируется более половины миграционного прироста населения всех белорусских территорий [5].

Многочисленны работы российских географов, посвященные миграции в города разного типа [6–12]. В ряде публикаций анализируются миграционные процессы на примере отдельных городов или агломераций [13–18].

Вместе с тем очевиден недостаток комплексных работ, затрагивающих весь спектр миграции в городской местности, слабо представлена их картографическая визуализация на разных территориальных уровнях. Данная статья направлена на выявление пространственных особенностей миграции в городах разного типа с помощью картографических изображений.

Материалы и методы исследования

Информационным базисом исследования являются данные ЕМИСС и Росстата за 2020–2023 гг. [19, 20].

На основе официальной статистики создана база геоданных на разных пространственных уровнях (страновой, региональный и муниципальный). Муниципальный уровень представлен городами с разной людностью, выполняемыми функциями, географическим положением. Использовались среднегодовые показатели численности городского населения, миграционного прироста, сальдо миграции.

Для построения карт разработана картографическая основа – карты европейской и азиатской частей России с обозначением субъектов РФ, городов с числом жителей 100 тыс. чел. и более построены в масштабе 1:15 000 000 и 1:25 000 000.

Картографические материалы созданы с помощью инструментария свободной кросс-платформенной геоинформационной системы QGIS. На заключительном этапе оформление картограмм осуществлялось посредством графического редактора Adobe Illustrator. В ходе исследования использовались статистический, сравнительно-географический методы, метод типологизации.

Результаты исследования и их обсуждение

Миграционные процессы в городской местности регионов РФ различаются в зависимости от позиционных особенностей. Наиболее благоприятная ситуация сложилась в пристоличных Ленинградской, Московской, Калужской областях, приграничной Калининградской области, ряде регионов с ресурсной ориентацией (Тюменская область, Ханты-Мансийский, Ненецкий АО), быстрорастущем Краснодарском крае, сочетающей ресурсную и этническую составляющие Якутии. Высокие показатели миграционного прироста в Республике Ингушетии вызывают сомнения. Вместе с тем в более чем половине субъектов РФ (54,1 %) фиксировалась миграционная убыль. Наиболее низкие показатели в европейской части страны демонстрировали республики СКФО и Астраханская область, а в азиатской – дальневосточные регионы.

С 2020 по 2023 г. миграционная убыль превышала миграционный прирост практически во всех российских городах. Особенно пострадали в этом отношении крупнейшие города. Отрицательный миграционный прирост отмечался и в более чем половине крупных и больших городов. Даже из 16 городов-миллионников только в 9 наблюдалась прибыль. Напротив, число средних и малых городов с убылью было относительно меньше, чем городов с численностью более 100 тыс. чел. (табл. 1). Среднегодовой коэффициент миграционного прироста в них составил 3,21 %, что значительно выше, чем аналогичный показатель в более многолюдных городах. По всей видимости, на миграционные процессы повлияли вначале неблагоприятные эпидемиологические, а затем и геополитические факторы, вследствие чего миграционный поток из многолюдных городов был частично перенаправлен в мелкие населенные пункты. Одновременно процесс убывания населения в городах с численностью свыше 100 тыс. чел. связан с перемещением горожан в более «дешевые» пригороды. Строительство новых жилых кварталов вблизи, но уже за пределами городских границ превращает новоселов (по статистическим данным) в мигрантов, которые фактически остаются жителями своих городов.

Таблица 1 / Table 1

**Среднегодовой миграционный прирост населения в российских городах разной людности
/ Average annual migration growth of population in Russian cities of different population sizes**

Тип города	Количество городов или регионов	В том числе				Миграционный прирост/убыль в среднем за год, %
		с миграционным приростом		с миграционной убылью		
		Кол-во городов или регионов	%	Кол-во городов или регионов	%	
Город-миллионник (более 1000 тыс. чел.)	16	9	56,2	7	43,8	1,23
Крупнейший (500–999 тыс. чел.)	21	6	28,6	15	71,4	-0,14
Крупный (250–499 тыс. чел.)	41	17	41,5	24	58,5	0,49
Большой (100–249 тыс. чел.)	87	44	49,4	45	50,6	0,24
Средний (50–99 тыс. чел.), малый (менее 50 тыс. чел.) город и пгт (по регионам)	82	46	56,1	36	43,9	3,21

В городах-миллионниках среднегодовой коэффициент миграционного прироста несколько превышал 1 %. В подавляющей части больших и крупных городов этот показатель был менее 1 %, но оставался положительным, а среди крупнейших преобладали города с отрицательными значениями сальдо миграции.

Значительно дифференцированы по характеру миграционных процессов города Московской области. Наиболее ярко проявилась тенденция роста пригородных территорий за счет миграций. Самый большой миграционный приток (г. Мытищи – 34 %, Обнинск – 11,1, Люберцы – 7,28, Красногорск – 6,31 % и др.) отмечался в городах – спутниках Москвы, входящих в первую пятёрку пригородных городов по качеству жизни. При этом в Москве коэффициент миграционного прироста не превышал 3 %. Вместе с тем из периферийных городов (или из московской глубинки, например г. Щелково), таких как Электросталь (-9,29 %), Коломна (-6,39 %) население уезжает (рис. 1).

Аналогичные процессы характерны и для других менее масштабных российских агломераций (Махачкалинская, Чебоксарская, Челябинская, Нижегородская и др.). Здесь коэффициент миграционного прироста в близлежащих к ядру городах составлял 3–6 % (рис. 1). Рекордные результаты прироста численности населения за счет миграции в городах-спутниках зафиксированы в южных агломерациях европейской части страны (Кавминводская, Краснодарская, Ставропольская), где миграционный прирост составлял в среднем 9–11 %. Следует отметить, что в этих агломерациях росли не только пригороды, но и города-ядра. Так, например, в Краснодаре, пополнявшем свои демографические ресурсы как за счет внутренней, так и международной миграции, миграционный прирост достигал 4,47 %. Кроме того, южные территории, традиционно принимавшие мигрантов из регионов Крайнего Севера, по-прежнему привлекательны для их жителей, а в города с развитой средой профессионального образования, особенно при наличии университетов, миграционные потоки дополнительно пополняются иностранными студентами.

За счёт внутрисредской миграции (преимущественно из малых поселений) растёт население ряда региональных столиц европейской части страны: Кирова (10,47 %), Йошкар-Олы (8,79 %), Калининграда (6,48 %), Петрозаводска (5,51 %) и др. (рис. 1). Однако большинство таких центров ощущает миграционную убыль.

Отток населения зафиксирован в значительной части городов – курортов Юга России: Сочи (-0,43 %), Пятигорске (-1,24 %), Кисловодске (-1,7 %).

Теряют население многие города с давней историей промышленного развития: Новочеркасск (-2,15 %), Сызрань (-2,44 %), Череповец (-2,75 %), Набережные Челны (-3,04 %), Волгодонск (-3,14 %), Невинномысск (-3,41 %), Тольятти (-3,88 %) и др. А вот малые и средние города некоторых областей Центральной России (вероятно, в разгар эпидемии COVID-19) получили миграционную прибыль.

В большинстве республик отмечается миграционная убыль населения, обусловленная низким уровнем социально-экономического развития и демографическим потенциалом (Черкесск (-1,85 %), Нальчик (-2,4 %), Грозный (-5,07 %), Майкоп (-7,67 %), Владикавказ (-5,47 %)). Исключение составляют Назрань (2,02 %) и Элиста (1,64 %).

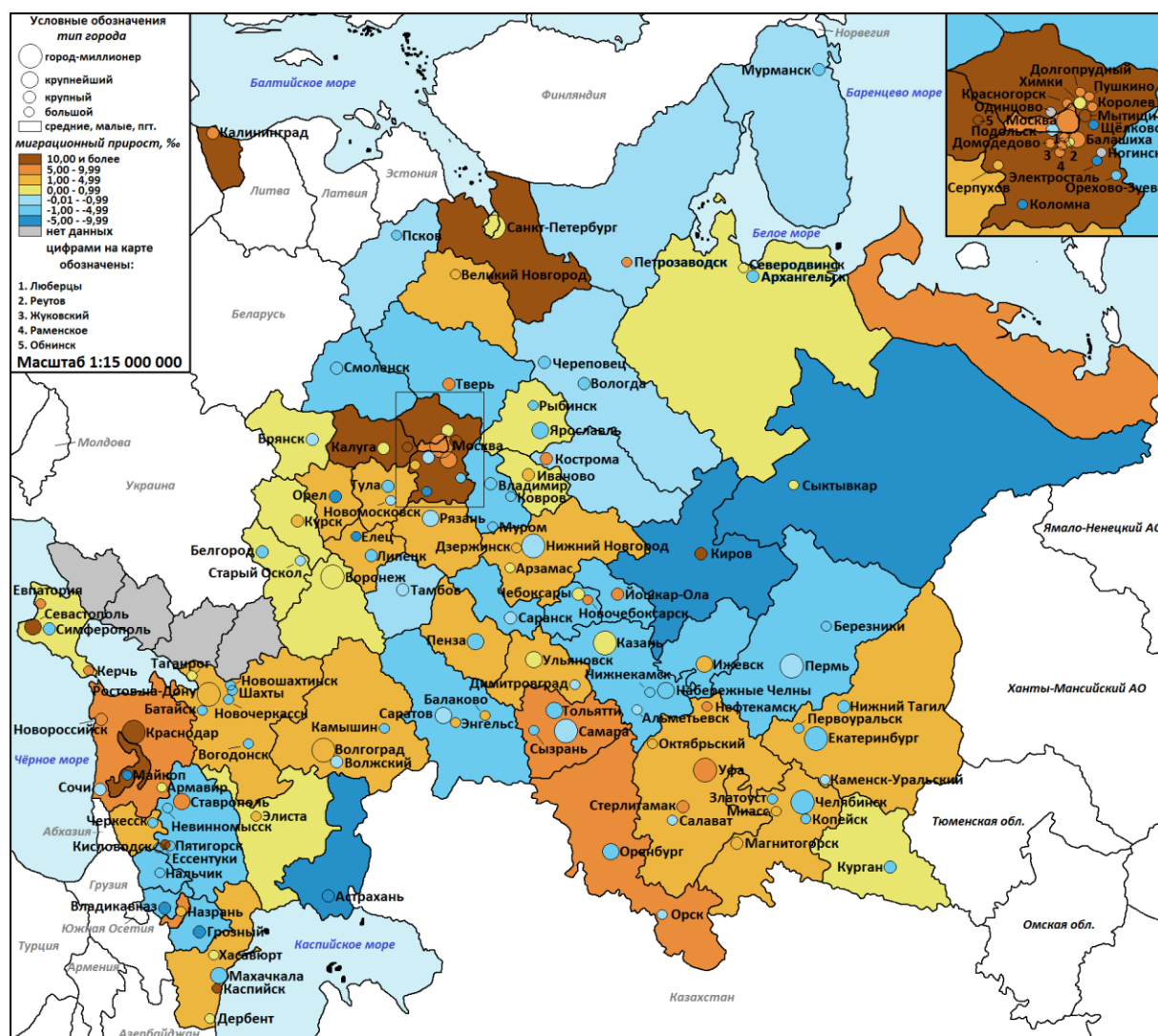


Рис. 1. Среднегодовой миграционный прирост в городах и городской местности регионов Европейской России в 2020–2023 гг., % / Fig. 1. Average annual migration growth of cities in European Russia in 2020–2023, %

Азиатскую часть страны по характеру миграционных процессов в городской местности можно условно (с некоторыми исключениями) разделить на растущий Север и убывающий Юг (рис. 2). Ожидаемо занимают высокие позиции нефтегазовые регионы Западной Сибири, в первую очередь крупнейший нефтедобывающий Ханты-Мансийский АО и его главные центры – Сургут и Ханты-Мансийск, остальные города существенно отстают от них, но все демонстрируют положительную динамику. Однако если в нефтяных городах миграционный прирост не только пока сохраняется, но и увеличивается, то в городах, специализирующихся (или имеющих высокую долю) на газовой промышленности, заметно сокращается, что, по-видимому, отражает общий спад в этой отрасли (табл. 2).

Набирают привлекательность быстрорастущие новые промышленные, в том числе и за счет ВПК, города, например Красноярск (3,39 %). Наблюдается значительно больший, чем в европейской части, прирост за счет сельско-городской миграции в республиканских центрах: Кызыле (3,9 %), Абакане (3,11 %), Якутске (12,69 %).

Таблица 2 / Table 2

Среднегодовой миграционный прирост городского населения в нефтегазовых регионах и городах Западной Сибири, % / Average annual migration growth of the urban population in the oil and gas regions and cities of Western Siberia, %

Территория	2015–2019 гг.	2020–2023 гг.
Тюмень	14,43	5,65
ХМАО	-0,05	7,46
Ханты-Мансийск	0,19	2,94
Сургут	4,46	8,16
Нижневартовск	-6,17	0,03
Нефтеюганск	-8,12	-1,45
ЯНАО	-7,42	-0,06
Новый Уренгой	-2,53	-9,81
Ноябрьск	-13,72	0,85

К числу убывающих вследствие миграции относятся многие региональные центры и крупные промышленные города азиатской России: Кемерово (-3,44 ‰), Омск (-3,48 ‰), Челябинск (-3,65 ‰), Курган (-4,13 ‰), Иркутск (3,9 ‰), Норильск (-2,98 ‰), Нижний Тагил (-3,29 ‰) и др. Наряду с крупными городами убыль населения прослеживается в малых и средних городах Чукотского АО, Алтайского края, Курганской и Кемеровской областей. Даже города-миллионники теряют население: Новосибирск (-0,9 ‰), Екатеринбург (-1,85 ‰), что, возможно, так же, как и в Европейской России, связано с ростом пригородов (рис. 2). Негативные миграционные процессы сохраняются в городах Дальнего Востока: Южно-Сахалинске (-4,83 ‰), Находке (-9,68 ‰), Комсомольске-на-Амуре (-1,21 ‰).



Рис. 2. Среднегодовой миграционный прирост в городах и городской местности регионов в азиатской России в 2020–2023 гг., % / Fig. 2. Average annual migration growth of cities in Asian Russia in 2020–2023, %

Заключение

Очевидно, что внутренний миграционный потенциал страны практически исчерпан, идет только перераспределение населения из одних поселений в другие, а основным источником роста городов становится международная миграция.

Достаточно явно в распределении мигрантов между городами просматриваются несколько тенденций:

1. Долговременная устойчивая.

Основные направления развития:

– прежде всего, будет продолжаться стягивание населения в центральные районы городских агломераций за счет его сокращения на периферии. При этом рост пригородов будет опережать рост городов-ядер;

– сохранится убыль населения за счет миграций в сибирских и дальневосточных городах;

– продолжится рост миграционного оттока из промышленных городов старого поколения (при условии отсутствия обновления или новых точек роста) и пополнение населения новых промышленных центров с высокой долей ВПК.

2. Долговременная исчерпывающаяся тенденция характерна для республиканских столиц, растущих за счет этнической сельско-городской миграции, которая исчерпывается по мере развития урбанизационного перехода отдельных этнических сообществ.

3. Ситуационная с перспективой превращения в долгосрочную.

Данный тренд проявляется в следующем:

– снижение миграционной привлекательности ресурсоориентированных (прежде всего, газовых) городов;

– миграционный прирост в малых и средних городах Европейской России с благоприятной городской средой или развивающихся за счет создания в них крупных производственных предприятий, а также в «городах-спальнях» при крупных центрах;

– возобновление миграционного прироста в региональных столицах вследствие сочетания внутрисероссийской и международной (в том числе образовательной) миграции и городов с выгодным географическим положением (портовые, приграничные, транспортные центры и т.п.).

Список источников

1. *Newbold K.B.* Migration Up and Down Canada's Urban Hierarchy // *Canadian J. of Urban Research*. 2011. Vol. 20, № 1. P. 131–149.
2. *Kotsubo M., Nakaya T.* Moving up and down the urban hierarchy: Age-specific internal migration patterns in Japan based on the 2020 census // *Population, Space and Place*. 2024. Vol. 30, № 7. Art. e2786. EDN: JNIZAD. <https://doi.org/10.1002/psp.2786>
3. *Mu X., Cui C., Cui J.* Migration up and down the urban hierarchy: The mediating effects of geographic mobility on migrants' homeownership // *Population, Space and Place*. 2023. Vol. 29, № 5. Art. e2663. EDN: GEZPQW. <https://doi.org/10.1002/psp.2663>
4. *Wang X., Qi W., Liu S., Liu Z., Gao P., Jin H.* The settlement intention of urban-to-urban migrants in China: Spatial differences and driving factors // *J. of Geographical Sci.* 2022. Vol. 32, № 12. P. 2503–2524. EDN: YWTAYL. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-2058-6>
5. *Рудевский Г.В.* Влияние агломерационных процессов на внутреннюю миграцию в Республике Беларусь // *Социальные новации и социальные науки*. 2024. № 1. С. 101–114. EDN: SIIWTH. <https://doi.org/10.31249/snsn/2024.01.06>
6. *Нефедова Т.Г.* Миграционная аттрактивность городов как индикатор трансформации постсоветского городского пространства России // *Наука. Инновации. Технологии*. 2014. № 2. С. 106–135. EDN: SQLAAJ.
7. *Мкртчян Н.В.* Стягивание населения России в крупные города и их пригороды // *Журн. Новой эконом. ассоциации*. 2024. № 2 (63). С. 241–248. EDN: FHPNEM. https://doi.org/10.31737/22212264_2024_2_241-248
8. *Мкртчян Н.В., Гильманов Р.И.* Крупные города России и их пригороды как центры притяжения внутренних мигрантов // *Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле*. 2023. Т. 68, № 1. С. 44–63. EDN: LXYZLA. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.103>
9. *Петухов Н.А.* Миграционная привлекательность городов – административных центров Российской Федерации // *Вестн. ЮРГТУ (НПИ)*. 2018. № 4. С. 8–15. EDN: YUNKJF. <https://doi.org/10.17213/2075-2067-2018-4-8-15>

10. Петухов Н.А. Преимущества крупных городов при миграции населения // РИСК: Ресурсы. Информация. Снабжение. Конкуренция. 2017. № 3. С. 125–130. EDN: ZKBAOT.
11. Петухов Н.А., Горидько Н.П. Миграционная привлекательность крупных российских городов // РИСК: Ресурсы. Информация. Снабжение. Конкуренция. 2017. № 4. С. 156–165. EDN: YTCTGL.
12. Логина Л.В. Потенциал возвратной миграции молодых россиян в малые города // Научные исследования: проблемы и перспективы развития : сб. ст. по материалам Всерос. нац. науч.-практ. конф. Саратов, 2024. С. 119–122. EDN: HUQSYN.
13. Ахметова Г.Ф. Тренды миграции в городе Уфе: историческая ретроспектива и современность // Экономика и управление. 2024. № 5. С. 147–154. EDN: FKJOYQ. <https://doi.org/10.34773/EU.2024.5.25>
14. Васильева Е.Н., Данилова Е.О. Социально-экономическая активность мигрантов в пространстве города Волгограда и Волгоградской области // Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та. Проблемы социально-гуманитарного знания. 2015. Т. 21, № 7 (167). С. 62–65. EDN: UZBMLP.
15. Гонтарь Н.В. Миграционный фактор динамики городского населения Ростовской области // Социально-экономическая география: теория, методология и практика преподавания: материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Десятые Максаковские чтения». М.: Сам полиграфист, 2024. С. 196–205. EDN: GYOCRO.
16. Махрова А.Г., Неведова Т.Г., Трейвиш А.И. Поляризация пространства Центрально-Российского мегалополиса и мобильность населения // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2016. № 5. С. 77–85. EDN: XSERYD.
17. Соловьев И.А., Зольникова Ю.Ф., Чихичин В.В., Овсянников Е.И. Демографические и миграционные процессы в Воронежской городской агломерации // Муниципальные образования регионов России: проблемы исследования, развития и управления: материалы V Всерос. межведомственной науч.-практ. конф. с междунар. участием. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2022. С. 129–137. EDN: OWWLCK.
18. Тиникова Е.Е. Социальная инфраструктура городов Хакасии – фактор миграции населения? // Ойкумена. Регионоведческие исследования. 2023. № 4. С. 36–42. EDN: QBDNYV. <https://doi.org/10.24866/1998-6785/2023-4/36-42>
19. Численность и миграция населения Российской Федерации в 2020, 2021, 2022, 2023 гг. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13283> (дата обращения: 13.03.2025).
20. Миграционный прирост населения по городам с числом жителей 100 тыс. человек и более. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/36719> (дата обращения: 13.03.2025).

References

1. Newbold K.B. Migration Up and Down Canada's Urban Hierarchy. *Canadian J. of Urban Research*. 2011;20(1):131-149.
2. Kotsubo M., Nakaya T. Moving up and down the urban hierarchy: Age-specific internal migration patterns in Japan based on the 2020 census. *Population, Space and Place*. 2024;30(7):e2786. EDN: JNIZAD. <https://doi.org/10.1002/psp.2786>
3. Mu X., Cui C., Cui J. Migration up and down the urban hierarchy: The mediating effects of geographic mobility on migrants' homeownership. *Population, Space and Place*. 2023;29(5):e2663. EDN: GEZPQW. <https://doi.org/10.1002/psp.2663>
4. Wang X., Qi W., Liu S., Liu Z., Gao P., Jin H. The settlement intention of urban-to-urban migrants in China: Spatial differences and driving factors. *Journal of Geographical Sciences*. 2022;32(12):2503-2524. EDN: YWTAYL. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-2058-6>
5. Ridevsky G.V. The influence of agglomeration processes on internal migration in the Republic of Belarus. *Social Innovations and Social Sciences*. 2024;(1):101-114. (In Russ.). EDN: SIIWTH. <https://doi.org/10.31249/snsn/2024.01.06>
6. Nefedova T.G. Migration attractiveness of cities as an indicator of the transformation of Russia's Post-Soviet urban space. *Science. Innovations. Technologies*. 2014;(2):106-135. (In Russ.). EDN: SQLAAJ.
7. Mkrtchyan N.V. Drawing of the Russian population into large cities and their suburb. *J. of the New Economic Association*. 2024;(2):241-248. (In Russ.). EDN: FHPNEM. https://doi.org/10.31737/22212264_2024_2_241-248
8. Mkrtchyan N.V., Gilmanov R.I. Big cities of Russia and their suburbs as centers of attraction of internal migrants. *Bulletin of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2023;68(1):44-63. (In Russ.). EDN: LXYZLA. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.103>
9. Petukhov N.A. Migration attractiveness of cities - administrative centers of the Russian Federation. *Bulletin of South-Russian State Polytechnic University (NPI)*. 2018;(4):8-15. (In Russ.). EDN: YUNKJF. <https://doi.org/10.17213/2075-2067-2018-4-8-15>
10. Petukhov N.A. Advantages of large cities during population migration. *RISC: Resources. Information. Supply. Competition*. 2017;(3):125-130. (In Russ.). EDN: ZKBAOT.
11. Petukhov N.A., Goridko N.P. Migration attractiveness of large Russian cities. *RISC: Resources. Information. Supply. Competition*. 2017;(4):156-165. (In Russ.). EDN: YTCTGL.

12. Loginova L.V. Potential of return migration of young Russians to small towns. *Scientific research: problems and prospects of development*: collection of articles based on the materials of the All-Russian National Scientific and Practical Conference. Saratov, 2024:119-122. (In Russ.). EDN: HUQCYN.
13. Akhmetova G.F. Migration trends in Ufa: historical retrospect and modernity. *Economics and Management*. 2024;(5):147-154. (In Russ.) EDN: FKJOYQ. <https://doi.org/10.34773/EU.2024.5.25>
14. Vasileva E.N., Danilova E.O. Social and economic activity of migrants in space of the city of Volgograd and the Volgograd region. *Proceedings of the Volgograd State Technical University. Series: Problems of social and humanitarian knowledge*. 2015;21(7):62-65. (In Russ.). EDN: UZBMLP.
15. Gontar N.V. Migration factor of urban population dynamics in the Rostov region. *Socio-economic geography: theory, methodology and teaching practice*: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "The Tenth Maksakov Readings". Moscow: Polygraph Examiner; 2024:196-205. (In Russ.). EDN: GYOCRO.
16. Makhrova A.G., Nefedova T.G., Treivish A.I. The Central Russian megalopolis: polarization of space and population mobility. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*. 2016;(5):77-85. (In Russ.). EDN: XSERYD.
17. Soloviev I.A., Zolnikova Yu.F., Chikhichin V.V., Ovsyannikov E.I. Demographic and migration processes in the Voronezh urban agglomeration. *Municipalities of the regions of Russia: problems of research, development and management*: proceedings of the 5th All-Russian Interdepartmental Scientific and Practical Conference with international participation. Voronezh: Digital Polygraphy; 2022:129-137. (In Russ.). EDN: OWWLCK.
18. Tinikova E.E. Social infrastructure of towns in Khakassia - factor of population migration? *Ecumene. Regional Researches*. 2023;(4):36-42. (In Russ.) EDN: QBDNYV. <https://doi.org/10.24866/1998-6785/2023-4/36-42>
19. *Population size and migration in the Russian Federation in 2020, 2021, 2022, and 2023*. (In Russ.). Available from: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13283> [Accessed 13th March 2025].
20. *Migration growth of population in cities with a population of 100 thousand people or more*. (In Russ.). Available from: <https://www.fedstat.ru/indicator/36719> [Accessed 13th March 2025].

Информация об авторах

И.А. Соловьев – доктор географических наук, доцент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений СКФУ.

Ю.Ф. Зольникова – кандидат географических наук, доцент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений СКФУ.

Н.А. Щитова – доктор географических наук, профессор департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений СКФУ.

Д.Г. Акинин – аспирант департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений СКФУ.

Information about the authors

I.A. Soloviev – Doctor of Science (Geography), Associate Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, NCFU.

J.F. Zolnikova – Candidate of Science (Geography), Associate Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, NCFU.

N.A. Shchitova – Doctor of Science (Geography), Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, NCFU.

D.G. Akinin – Postgraduate Student, Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, NCFU.

*Статья поступила в редакцию 09.07.2025; одобрена после рецензирования 11.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 09.07.2025; approved after reviewing 11.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

Научная статья
УДК 551.583 (571.150)
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-103-111>

ХАРАКТЕРИСТИКА ФАЗ ВЕСЕННЕ-ЛЕТНЕГО СЕЗОНА ГОДА НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Алёна Сергеевна Стребкова^{1✉}, *Мария Владимировна Карманова*²,
*Галина Ильинична Ненашева*³

^{1, 2, 3} Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

¹alena040994@mail.ru✉

²karmmv@yandex.ru

³nenasheva@mc.asu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2900-1253>

Аннотация. Представлены результаты исследования временных границ и продолжительности структурных фаз весенне-летнего сезона на территории Алтайского края в условиях современных климатических изменений. На основе анализа метеорологических данных за период 2004–2024 гг. по 10 метеостанциям с использованием критериев устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через различные пределы (-5, 0, +5, +10, +15 °С) приводится характеристика фаз весенне-летнего сезона года на территории Алтайского края: для весны – «снеготаяние», «послезимье», «предлетье»; для лета – «умеренно прохладное лето», «умеренно теплое лето», «спад лета». В работе применена геоинформационная система QGIS 3.34.3 для автоматизированной обработки метеорологических данных и построения пространственной модели продолжительности периода по пороговым значениям среднесуточных температур. Проведенный анализ выявил устойчивую тенденцию к трансформации сезонной структуры, установлено, что начало фазы «снеготаяние» смещается на вторую декаду марта, увеличивая общую продолжительность весеннего сезона. Полученные данные выявляют специфические региональные особенности изменения фаз весенне-летнего сезона в пределах Алтайского края.

Ключевые слова: климатические изменения, фазы сезонов, весенне-летний период, структура сезона года, изменение временных границ, продолжительность климатических сезонов

Для цитирования: Стребкова А.С., Карманова М.В., Ненашева Г.И. Характеристика фаз весенне-летнего сезона года на примере территории Алтайского края // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 103–111. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-103-111>

Благодарности: работа выполнена в рамках гранта РФФ № 24-27-20087 «Аллергокомфортность природной среды и аттрактивность рекреационных территорий юга Западной Сибири как основа развития лечебно-оздоровительного туризма».

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

Original article

CHARACTERISTICS OF THE PHASES OF THE SPRING-SUMMER SEASON ON THE EXAMPLE OF THE ALTAI TERRITORY

Alena S. Strebkova^{1✉}, *Maria V. Karmanova*², *Galina I. Nenasheva*³

^{1, 2, 3} Altai State University, Barnaul, Russia

© Стребкова А.С., Карманова М.В., Ненашева Г.И., 2025

¹alena040994@mail.ru✉

²karmmv@yandex.ru.

³¹nenasheva@mc.asu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2900-1253>

Abstract. The article presents the results of the study of the temporal boundaries and duration of the structural phases of the spring-summer season in the Altai Territory in the conditions of modern climate change. Based on the analysis of meteorological data for the period 2004-2024 from 10 weather stations using criteria of stable transition of the average daily air temperature through various thresholds (-5, 0, +5, +10, +15 °C), the characteristics of the phases of the spring-summer season in the Altai Territory are given: for spring – “snowmelt”, “late spring”, “early summer”; for summer – “moderately cool summer”, “moderately warm summer”, “late summer”. The geoinformation system QGIS 3.34.3 was used in the work for automated processing of meteorological data and building a spatial model of the duration period based on threshold values of average daily temperatures. The analysis revealed a stable tendency towards the transformation of the seasonal structure, it was established that the beginning of the “snowmelt” phase shifts to the second decade of March, increasing the overall duration of the spring season. The obtained data reveal specific regional features of changes in the phases of the spring-summer season within the Altai Territory.

Keywords: climate change, seasonal phases, spring-summer period, seasonal structure of the year, changing temporal boundaries, duration of climatic seasons

For citation Strebkova A.S., Karmanova M.V., Nenasheva G.I. Characteristics of the Phases of the Spring-Summer Season on the Example of the Altai Territory. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):103-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-103-111>

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 24-27-20087 “Allergy comfort of the natural environment and the attractiveness of recreational areas in the south of Western Siberia as a basis for the development of medical and health tourism.”

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

Введение

Изучение современной динамики климатических сезонов, включая трансформацию их временных границ и продолжительность, относится к числу значимых направлений научных исследований. Актуальность подтверждается работами, посвященными исследованию климатической структуры годового цикла и характеристике фаз сезонов года [1–4]. Сезонная динамика основных метеорологических параметров, таких как температурный режим, влажность воздуха и количество осадков, оказывает определяющее влияние на все природные процессы и сезонные явления. Особую значимость приобретает изучение изменений данных показателей в условиях наблюдаемых климатических трансформаций [5].

Согласно Докладу об особенностях климата на территории РФ, повышение температуры отмечается во всех регионах страны и во все климатические сезоны. Среднегодовая температура в России увеличивается со скоростью +0,50 °C за десятилетие (линейный тренд) (этот показатель составляет 60 % общей климатической изменчивости). Наиболее интенсивное потепление происходит весной, однако с учетом межгодовых колебаний летний тренд выражен наиболее явно [6]. Колебания аномальных и средних значений температур воздуха обусловлены совокупным влиянием физико-географических характеристик территории, атмосферной циркуляции и сезонных особенностей.

Методологическую новизну исследования составляет применение геоинформационной системы QGIS 3.34.3 для автоматизированной обработки и пространственного моделирования метеоданных. С использованием TIN-интерполяции (триангуляционная нерегулярная сеть) построена непрерывная поверхность, отражающая продолжительность периода устойчивой температуры выше +10 °C в днях по всей территории региона. Данный подход учитывает как плотность сети метеостанций, так и рельефно-климатическую неоднородность территории, обеспечивая более достоверную пространственную репрезентацию, чем традиционные методы растровой интерполяции. Полученная модель не является конечной целью, а служит основой для последующих междисциплинарных исследований. В перспективе она может быть интегрирована с картографическими материалами, отражающими распространение растительных сообществ, данными дистанционного зондирования или фенологическими наблюдениями. Это откроет возможности

для комплексного анализа соответствия между климатически определяемыми границами вегетационного периода и реальной сезонной динамикой растительного покрова, а также для оценки чувствительности различных экосистем к современным климатическим изменениям. Особый интерес вызывает влияние смещения временных границ сезона на фенологию растений, прежде всего на сроки начала и продолжительность цветения. Это связано с тем, что именно в весенне-летний период происходит массовое пыление, в том числе аллергенно значимых видов. Цель наших исследований заключается в изучении временных границ и продолжительности структурных единиц весенне-летнего сезона на территории Алтайского края.

Материалы и методы исследования

Исследование охватывает территорию Алтайского края, где в течение года преобладает антициклональная деятельность. Её сезонная динамика интенсивности проявляется в ослаблении в весенне-летний период из-за прогрева подстилающей поверхности и в усилении в холодное время года, обусловленном активизацией Азиатского антициклона. В летнее время термические контрасты различных воздушных масс сглаживаются вследствие уменьшения широтных различий радиационного баланса, прохождение фронтов циклонов сопровождается более обильными осадками, чем в холодный период. Весенний период в регионе характеризуется активным влиянием циклонов северо-западного происхождения, которые приносят похолодание, провоцируют поздние заморозки и снегопады. Современные исследования подтверждают, что климатообразующие факторы Алтайского края обуславливают выраженную пространственно-временную изменчивость термического режима, проявляющуюся, в частности, в изменении сроков наступления фаз сезонов [7–9].

Теоретико-методологическую основу исследования формируют научные работы [10–12], посвященные анализу сезонной ритмики с позиции комплексно-генетического подхода, а также методологические принципы изучения сезонной динамики природных процессов [13]. Для выделения отдельных фаз годового цикла применялись температурные критерии, предложенные в [11] и адаптированные для условий Алтайского края в [13]. Весенний период был разделён на три последовательные фазы. Первая – «снеготаяние» – начинается при устойчивом переходе среднесуточной температуры через $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и завершается при достижении $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. За ней следует «послезимье», ограниченное переходами через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (начало) и $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (окончание). Завершает весну фаза «пред-летье», которая длится от устойчивого перехода через $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до момента, когда температура стабильно превышает $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Летний сезон также разбит на три части. Его начало – «умеренно прохладное лето» – охватывает период от устойчивого превышения $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до достижения $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее идёт «умеренно теплое лето», в течение которого среднесуточная температура остаётся выше $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Завершает лето фаза «спад лета», начинающаяся при сохранении температуры выше $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заканчивающаяся, когда она вновь опускается до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расчет дат устойчивого перехода температуры воздуха через различные пределы фиксировался по периоду превышения положительных (отрицательных) отклонений среднесуточной температуры от порогового значения [14]. Так как фенологические маркеры климатических сезонов остаются неизменными, а временные границы наступления этих сезонных явлений определяются динамикой среднесуточных температур, для точного представления норм и отклонений сезонных характеристик репрезентативным является временной ряд наблюдений продолжительностью 15 лет и более [15, 16]. В исследовании в качестве климатической нормы использованы данные, осреднённые за период 1881–1960 гг. [17].

Статистическая оценка продолжительности фаз климатических сезонов проведена по обобщённым материалам многолетних наблюдений ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» за среднесуточными температурами воздуха по 10 метеорологическим станциям: Алейская, Баево, Барнаул, Змеиногорск, Бийск-Зональная, Камень-на-Оби, Ключи, Ребриха, Рубцовск, Славгород за период с 2004 по 2024 г. По каждому временному ряду рассчитывались среднее значение, медиана, стандартное отклонение и стандартная ошибка. Доверительные интервалы рассчитаны по t-распределению Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($n = 21$). Относительная ошибка $\leq 5\%$ считается приемлемой. Для картографической визуализации данных применялись инструменты ГИС QGIS 3.34.3. Территориальное распределение исследуемых параметров (даты наступления и окончания фаз сезонов, их продолжительность) отображалось с применением комбинаций изолиний с нерегулярными меш-сетками, несущими атрибутивную информацию о временных и количественных показателях фазы сезона.

Результаты и обсуждение

Средняя многолетняя структура весеннего сезона на территории Алтайского края трехфазная, включает в себя следующие структурные единицы: «снеготаяние», «последзимье», «предлетье» [11, 13]. Начало весны (фаза «снеготаяние») соответствует переходу среднесуточной температуры через -5°C , а заканчивается переходом через $+10^{\circ}\text{C}$ и прекращением заморозков. На территории Алтайского края средняя продолжительность весеннего сезона варьируется от 38 (Славгород) до 49 дней (Змеиногорск, Бийск-Зональная) (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Основные статистические характеристики продолжительности весеннего сезона по метеостанциям Алтайского края (2004–2024 гг.) / The main statistical characteristics of the duration of the spring season at the weather stations of the Altai Territory (2004–2024)

Метеостанция	Min l , дней	Max l , дней	Среднее значение выборки \bar{x}	Стандартное отклонение выборки σ	$S\bar{x}$
Бийск-Зональная	33	81	49,5	15,9	3,5
Ребриха	34	73	49,0	11,9	2,6
Барнаул	18	74	47,0	13,8	3,0
Змеиногорск	33	82	49,5	14,0	3,1
Камень-на-Оби	34	66	46,9	8,8	1,9
Баево	18	73	44,2	14,4	3,1
Алейская	17	71	45,1	12,9	2,8
Ключи	16	70	40,9	14,2	3,1
Рубцовск	17	70	40,5	12,4	12,4
Славгород	17	63	38,4	11,3	11,3

Примечание. min, max l – продолжительность; $S\bar{x}$ – стандартная ошибка среднего значения выборки.

Самая ранняя дата начала фазы «снеготаяние» отмечалась 21.02.2023 (Ключи, Баево, Ребриха), что обусловлено возникновением продолжительных оттепелей в конце февраля, сопровождавшихся максимальными дневными температурами до $+4,9^{\circ}\text{C}$. Самая поздняя дата наступления данной фазы зафиксирована 1 апреля 2011 г. (Ребриха, Камень-на-Оби). Наибольшая продолжительность фазы составляет 41 день в 2023 г. (Бийск-Зональная), наименьшая – 2 дня (рис. 1). В четырех случаях фаза «снеготаяние» отсутствовала.

Вторая фаза весны «последзимье» характеризуется устойчивым переходом среднесуточной температуры воздуха через 0°C , незначительным отличием ночных температур от зимних значений, в то же время дневные оттепели устойчивы. Интенсивное таяние снежного покрова происходит на фоне возможных вторжений холодных воздушных масс, сопровождаемых сильным ветром и выпадением осадков в виде снега. Такие метеорологические колебания обуславливают формирование временного снежного покрова. Для данной фазы характерны признаки начала вскрытия рек. Средняя продолжительность фазы «последзимье» по территории края составляет от 9 до 17 дней. В отдельном случае, в 2012 г., по метеостанции Баево фаза «последзимье» отсутствует. По данным остальных метеостанций, 2012 г. характеризуется кратковременным проявлением данной фазы, что связано с аномально тёплым весенне-летним сезоном на территории Российской Федерации.

В заключительной фазе весны («предлетье») отмечается устойчивая тенденция к повышению температуры, преобладают безморозные ночи, при этом сохраняется вероятность кратковременных возвратов холодных периодов. Основным фенологическим процессом на данном этапе является возобновление вегетации растений, индикатором начала фазы служит набухание почек у древесно-кустарниковых пород. Самая ранняя дата начала фазы «предлетье» отмечалась 30 марта 2014 г. Наибольшая продолжительность фазы составила 40 дней в 2012 г. (Камень-на-Оби, Баево), продолжительной фазе «предлетье» соответствует отсутствие фазы «последзимье».

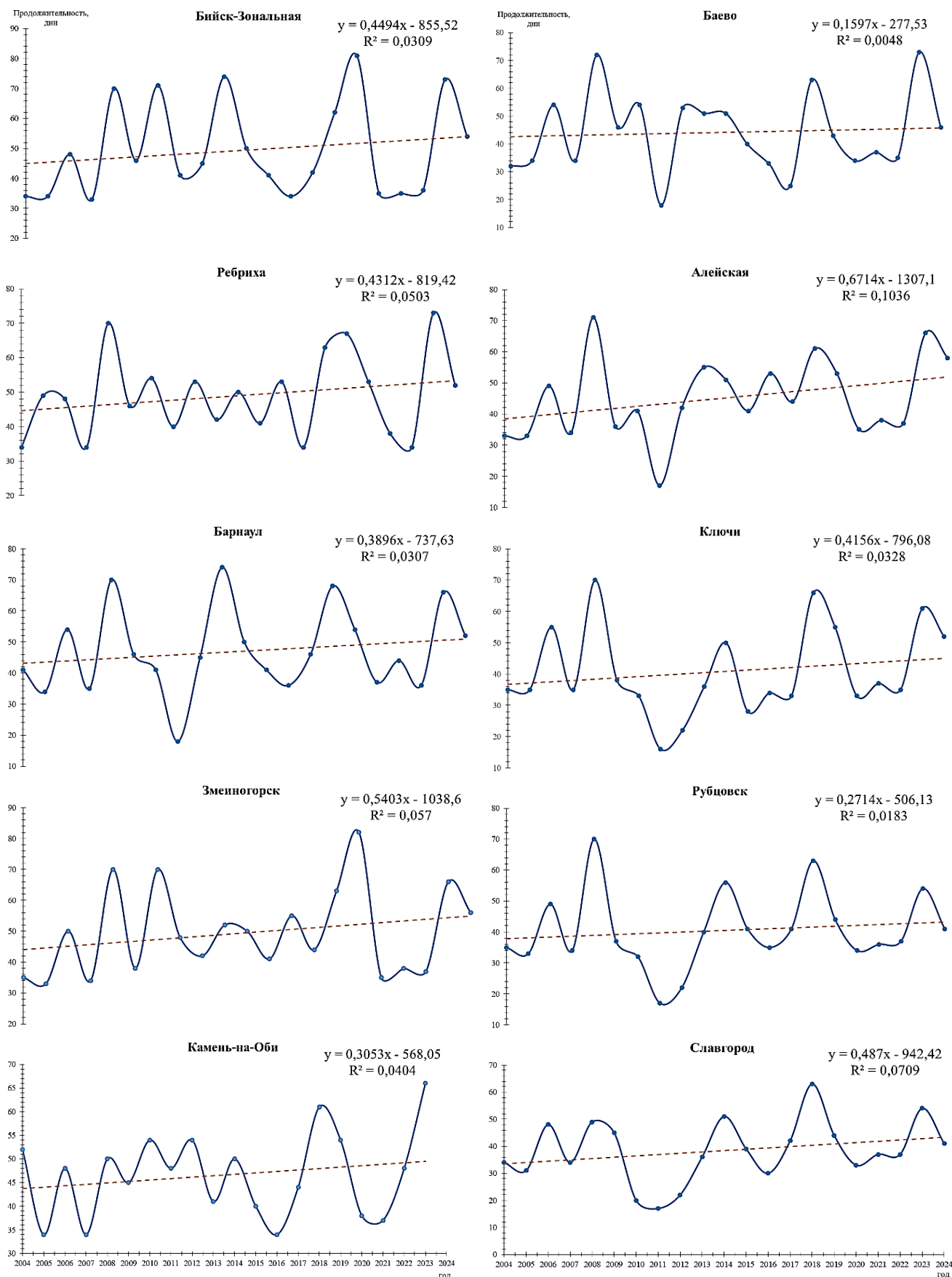


Рис 1. Динамика продолжительности весеннего сезона на территории Алтайского края (2004–2024 гг.)
/ Fig. 1. Dynamics of the duration of the spring season in the Altai Territory (2004-2024)

В 30 % случаев продолжительность фазы «предлетье» составляет менее 10 дней, что обусловлено ранним установлением устойчивых положительных температур более +10 °С и опережающим развитием термических условий, характерных для летнего сезона.

Летний период представляет собой ключевой сезон года с наиболее интенсивным протеканием энергетических процессов. На территории Алтайского края средняя многолетняя структура летнего сезона – трехфазная, включает в себя «умеренно прохладное лето», «умеренно теплое лето» и «спад лета». В настоящем исследовании границы летнего сезона определяются устойчивым переходом среднесуточной температуры воздуха через +10 °С, что соответствует прекращению заморозков на почве и началу безморозного периода. Продолжительность фаз летнего сезона соотносится с зональным градиентом теплообеспеченности территории края (рис. 2). На территории края средняя продолжительность летнего сезона варьируется от 138 (Ребриха) до 162 дней (Бийск-Зональная) (табл. 2).

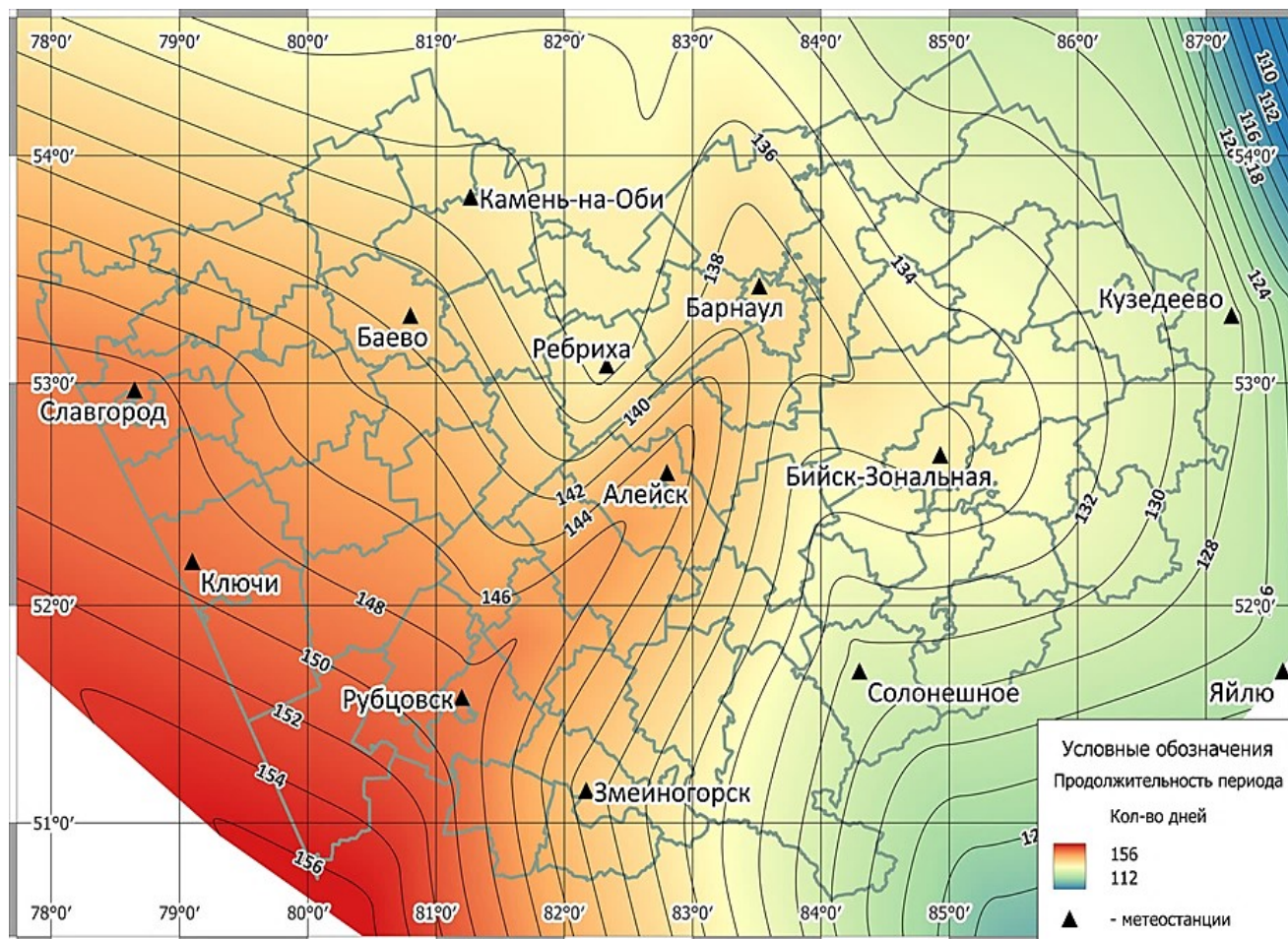


Рис. 2. Продолжительность периода устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через +10 °С на территории Алтайского края (2004–2024 гг.) / Fig. 2. Duration of the period of stable transition of the average daily air temperature through +10 °C in the Altai Territory (2004-2024)

Фаза «умеренно прохладное лето» характеризуется переходом среднесуточной температуры воздуха через +10 °С в начале и через +15 °С в конце периода, что сопровождается увеличением теплового потенциала. Средняя продолжительность данной фазы в исследуемый период варьирует от 24 до 27 дней. Наибольшая длительность фазы (49–57 дней) зарегистрирована в 2007 г. на метеостанциях Бийск-Зональная и Змеиногорск. Самое раннее начало фазы отмечено 11 апреля 2012 г. на фоне повышенных температур относительно среднемесячных значений, наиболее позднее начало зафиксировано 27 мая 2013 г.

Фаза «умеренно тёплое лето» определяется устойчивым переходом среднесуточной температуры воздуха через +15 °С как при её наступлении, так и при завершении. В этот период температура почвы, как правило, превышает температуру воздуха, что свидетельствует о снижении

суточной амплитуды колебаний температуры по сравнению с другими летними фазами. Самое раннее начало фазы зафиксировано 10 мая 2004 г. на метеостанции Славгород, самое позднее – 4 июля 2009 г., что связано с затяжным течением предшествующей фазы «умеренно прохладное лето». Продолжительность фазы варьировала от минимальных 59 дней в 2009 г. (метеостанция Ребриха) до максимальных 130 дней в 2015 г. (метеостанция Славгород).

Таблица 2 / Table 2

Основные статистические характеристики продолжительности летнего сезона по метеостанциям Алтайского края (2004–2024 гг.) / The main statistical characteristics of the duration of the summer season at the weather stations of the Altai Territory (2004-2024)

Метеостанция	Min l , дней	Max l , дней	Среднее значение выборки \bar{x}	Стандартное отклонение выборки σ	$S\bar{x}$
Бийск-Зональная	134	283	162,5	30,8	6,7
Ребриха	110	163	138	12,5	2,7
Барнаул	175	208	190	7,5	1,6
Змеиногорск	109	161	142,7	12,5	2,7
Камень-на-Оби	110	161	138,5	11,6	2,5
Бавово	128	167	142,9	11	2,4
Алейская	129	181	145,3	12,9	2,8
Ключи	132	191	152,1	14,5	3,2
Рубцовск	129	177	148,6	13,7	3,0
Славгород	129	191	150	16	3,5

Примечание. min, max l – продолжительность; $S\bar{x}$ – стандартная ошибка среднего значения выборки.

Начало третьей фазы «спад лета» выделяется по дате перехода среднесуточной температуры воздуха через +15 °С в начале периода и устойчивым переходом через +10 °С в его завершении. Данная фаза характеризуется устойчивым понижением температурного режима и возрастающей амплитудой межсуточных колебаний температуры воздуха. Наиболее раннее наступление фазы зафиксировано 13 августа 2017 г. (метеостанция Барнаул), тогда как наиболее позднее начало отмечено 22 сентября 2016 г. (метеостанция Рубцовск). Средняя продолжительность исследуемой фазы составляет 19 дней.

За рассматриваемый период 2004–2024 гг. выявлена статистически значимая тенденция увеличения продолжительности весеннего сезона на шести метеостанциях Алтайского края: Бийск-Зональная, Ребриха, Змеиногорск, Ключи, Рубцовск и Славгород. Градиент тренда составляет от +1,0 до +1,25 дня в год, и таким образом за 20 лет продолжительность весеннего сезона увеличивается на 20–25 дней. На остальных станциях изменения продолжительности как весеннего, так и летнего сезонов статистически незначимы. Полученные результаты согласуются с данными других исследований, выполненных на территории Западной Сибири [3, 4, 8, 9], фиксирующих удлинение вегетационного периода года. Это проявляется в устойчивом росте продолжительности весеннего сезона, что может свидетельствовать не столько об общем потеплении, сколько о перераспределении фаз внутри весенне-летнего сезона года.

Выводы

За исследуемый период определены многолетние показатели дат начала и конца, продолжительности структурных единиц весенне-летнего сезона на территории Алтайского края. Наблюдается увеличение общей продолжительности весеннего сезона со смещением начала фазы «снеготаяние» на вторую декаду марта, а также смещение фазы «умеренно прохладное лето» на 5–8 сут в сторону более ранних сроков. Однако анализ показывает, что процесс смещения начала тёплого сезона на более ранние даты носит неоднородный характер. В Алтайском крае он проявляется не столько в удлинении всего весенне-летнего сезона, сколько в структурной перестройке его внутренних фаз. Дальнейшие исследования позволят проанализировать временные границы фаз весенне-летнего сезона с учётом их влияния на фенологические процессы, особенно на динамику пыления растений. Понимание связи между климатически обусловленными фазами сезона и интенсивностью пыления может стать основой для разработки прогнозных моделей аллергенной нагрузки.

Список источников

1. Садоков В.П., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н.Н. Определение весенних дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0, +5 °С, их прогноз и оценка // Тр. Гидрометеорол. НИЦ РФ 2012. № 348. С. 162–172. EDN: PTTLTL.
2. Ширяев М., Семенов В., Ширяева А. Изменения продолжительности устойчивых теплого и холодного сезонов на территории России в начале XXI века // Докл. АН. 2018. Т. 481, № 2. С. 207–210. EDN: YBLUMX. <https://doi.org/10.31857/S086956520001206-9>
3. Литвинова О.С., Гуляева Н.В. Структура фаз летнего сезона на юго-востоке Западной Сибири // Геогр. вестн. 2016. № 4 (39). С. 57–69. EDN: XUXLOD. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-4-57-69>
4. Литвинова О.С. Климатическая структура зимнего сезона на юго-востоке Западной Сибири // Электр. науч.-метод. журн. Омского ГАУ. 2017. № 4 (11). URL: <http://ejournal.omgau.ru/images/issues/2017/4/00474.pdf>. (дата обращения: 14.06.2025). EDN: YLBJXS.
5. Винокуров Ю.И., Красноярова Б.А., Харламова Н.Ф., Плуталова Н.Г., Шарабарина С.Н. Районирование территории Алтайского края по степени проявления климатических рисков // Вестн. ЗабГУ. 2024. № 2. С. 8–20. EDN: DPHGJS. <https://doi.org/10.2109/2227-9245-2024-30-2-8-20>
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М.: Росгидромет, 2025. 104 с.
7. Репко А.Г., Барышникова О.Н. Структура годового цикла 2014 года и продуктивность геосистем на территории Алтайского края // География и природопользование Сибири. 2020. № 27. С. 165–172. EDN: IPLLUD.
8. Максимова Н.Б., Арнаут Д.В., Морковкин Г.Г. Оценка продолжительности климатических сезонов года по агроклиматическим районам Алтайского края в условиях меняющегося климата // Вестн. АГАУ. 2016. № 11 (145). С. 48–53. EDN: USOLCP.
9. Максимова Н.Б., Морковкин Г.Г., Ненашева Г.И. Динамика сроков наступления вегетационного периода по природно-почвенным зонам Алтайского края за 1955–2020 годы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4 (220). С. 110–117. EDN: AHISQK. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-110-117>
10. Галахов Н.Н. Изучение структуры климатических сезонов года. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 183 с.
11. Рутковская Н.В. Климатическая характеристика сезонов года Томской области. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1979. 116 с.
12. Филандышева Л.Б., Окишева Л.Н. Сезонные ритмы природы Западно-Сибирской равнины. Томск: Пеленг, 2002. 402 с. EDN: SYPZST.
13. Харламова Н.Ф., Ревакин В.С., Леконцев Б.А. Климат и сезонная ритмика природы Барнаула. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2005. 144 с. EDN: QKFTVN.
14. Стребкова А.С., Ненашева Г.И., Козырева Ю.В. Временные характеристики весенне-летнего сезона года в городе Барнауле // Географические исследования Сибири и Алтае-Саянского трансграничного региона : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти д.г.н., профессора В.С. Ревакина (26 марта 2025 г., Институт географии АлтГУ, г. Барнаул). Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2025. С. 395–399. EDN: JIBPUQ.
15. Филандышева Л.Б., Ромашова Т.В., Юркова К.Д. Многолетние изменения временных характеристик сезонов года в подтайге Западно-Сибирской равнины // Современные проблемы географии и геологии: к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Томск, 16–19 октября 2017 г.). Томск: Нац. исслед. Томский гос. ун-т, 2017. Т. 1. С. 472–475.
16. Соловьев Л.Н. Биота и климат в XX столетии. Региональная фенология. М.: Пасьева, 2005. 288 с.
17. Справочник по климату СССР. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. Вып. 20. 196 с.

References

1. Sadokov V.P., Kozeltseva V.F., Kuznetsova N.N. Determination of spring dates of steady transition of average daily air temperature through 0.5 °C, their forecast and assessment. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2012;(348):162-172. (In Russ.). EDN: PTTLTL.
2. Shiryayev M., Semenov V., Shiryayeva A. Changes in the duration of stable warm and cold seasons in Russia at the beginning of the 21st century. *Reports of the Academy of Sciences*. 2018;481(2):207-210. (In Russ.). EDN: YBLUMX. <https://doi.org/10.31857/S086956520001206-9>
3. Litvinova O.S., Gulyaeva N.V. The structure of the phases of the summer season in the south-east of Western Siberia. *Geographical Bulletin*. 2016;(4):57-69. (In Russ.). EDN: XUXLOD. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-4-57-69>
4. Litvinova O.S. The climatic structure of the winter season in the south-east of Western Siberia. *Electronic Scientific and Methodological Journal of the Omsk State Agrarian University*. 2017;(4). Available from: <http://ejournal.omgau.ru/images/issues/2017/4/00474.pdf> [Accessed 14th June 2025]. (In Russ.). EDN: YLBJXS.

5. Vinokurov Yu.I., Krasnoyarova B.A., Kharlamova N.F., Plutalova N.G., Sharabarina S.N. Zoning of the territory of the Altai Territory according to the degree of manifestation of climate risks. *Bulletin of the Trans-Baikal State University*. 2024;(2):8-20. (In Russ.). EDN: DPHGJS. <https://doi.org/10.2109/2227-9245-2024-30-2-8-20>
6. *Report on the peculiarities of climate in the Russian Federation for 2024*. Moscow, 2025. 104 p. (In Russ.).
7. Repko A.G., Baryshnikova O.N. Structure of the annual cycle of 2014 and productivity of geosystems in the Altai Territory. *Geography and Environmental Management of Siberia*. 2020;(27):165-172. (In Russ.). EDN: IPLUD.
8. Maksimova N.B., Arnaut D.V., Morkovkin G.G. Assessment of the duration of the climatic seasons of the year in the agro-climatic regions of the Altai Territory in a changing climate. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2016;(11):48-53. (In Russ.). EDN: USOLCP.
9. Maksimova N.B., Morkovkin G.G., Nenasheva G.I. Dynamics of the timing of the onset of the growing season in the natural and soil zones of the Altai Territory in 1955-2020. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(4):110-117. (In Russ.). EDN: AHISQK. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-110-117>
10. Galakhov N.N. *Studying the structure of the climatic seasons of the year*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1959. 183 p. (In Russ.).
11. Rutkovskaya N.V. *Climatic characteristics of the seasons of the Tomsk region*. Tomsk: Publishing House of the Tomsk University; 1979. 116 p (In Russ.).
12. Filandysheva L.B., Okisheva L.N. *Seasonal rhythms of the nature of the West Siberian plain*. Tomsk: Bearing; 2002. 402 p. (In Russ.). EDN: SYPZST.
13. Kharlamova N.F., Revyakin V.S., Lekontsev B.A. *The climate and seasonal rhythmicity of Barnaul's nature*. Barnaul: Publishing House of the Altai University; 2005. 144 p. (In Russ.). EDN: QKFTVN.
14. Strebkova A.S., Nenasheva G.I., Kozyreva Y.V. Temporary characteristics of the spring-summer season in the city of Barnaul. *Geographical research of Siberia and the Altai-Sayan transboundary region: collection of articles of the International Scientific-Practical Conference dedicated to the memory of Doctor of Geography, Professor V.S. Revyakin (March 26, 2025, Institute of Geography of Altai State University, Barnaul)*. Barnaul: Publishing House of Altai University; 2025:395-399. (In Russ.). EDN: JIBPUQ.
15. Filandysheva L.B., Romashova T.V., Yurkova K.D. Long-term changes in the temporal characteristics of the seasons in the under-taiga zone of the West Siberian Plain. *Modern problems of geography and geology: on the 100th anniversary of the opening of the Natural Sciences Department at Tomsk State University*. Proceedings of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Tomsk, October 16-19, 2017. Tomsk: National Research Tomsk State University; 2017;1:472-475. (In Russ.).
16. Soloviev L.N. *Biota and climate in the 20th century. Regional phenology*. Moscow: Pasva; 2005. 288 p. (In Russ.).
17. *Reference book on the climate of the USSR: Air and soil temperature*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1965. Iss. 20. 196 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.С. Стребкова – старший преподаватель кафедры природопользования и геоэкологии АГУ.

М.В. Карманова – кандидат технических наук, доцент кафедры физической географии и геоинформационных систем АГУ.

Г.И. Ненасьева – кандидат географических наук, доцент, заведующая кафедрой физической географии и геоинформационных систем АГУ.

Information about the authors

A.S. Strebkova – Senior Lecturer of the Department of Nature Management and Geoecology, ASU.

M.V. Karmanova – Candidate of Science (Technical), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Geoinformation Systems, ASU.

G.I. Nenasheva – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Head of the Department of Physical Geography and Geoinformation Systems, ASU.

Статья поступила в редакцию 09.07.2025; одобрена после рецензирования 12.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 09.07.2025; approved after reviewing 12.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 551.466.31; 551.326.7; 551.435.362(551.468)

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-112-124>

РАЙОНИРОВАНИЕ АКВАТОРИЙ И БЕРЕГОВ АЗОВСКОГО МОРЯ И СЕВЕРНОГО КАСПИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ АНСАМБЛЕЙ ОПАСНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Наталья Александровна Яицкая

Субтропический научный центр Российской академии наук, Сочи, Россия
yaitskaya@gmail.com

Аннотация. Описаны результаты комплексного геоэкологического районирования побережья и акваторий Азовского моря и Северного Каспия для периода с 2000 по 2020 г. В основу районирования положены следующие параметры: штормовое волнение, рассчитанное с использованием спектральной волновой модели SWAN и на основе глобального реанализа ERA-Interim; расчетные значения динамической нагрузки на берег от штормового волнения; припай и ледяные торосистые образования по данным многолетних наблюдений. В качестве пороговых значений опасности приняты опубликованные в нормативных документах Росгидромета и актуальные на момент публикации. В основу районирования положено выделение прибрежных участков моря или открытой акватории с однородным воздействием опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний. Описание районов дополнено опубликованными сведениями о геоморфологии берегов морей и скоростях прибрежной абразии из литературных источников и собственными данными. В пределах береговой зоны Азовского моря выделено 20 районов, интегральный балл геоэкологической опасности варьируется от 3 до 10. В пределах береговой зоны Северного Каспия выделено 9 районов, интегральный балл геоэкологической опасности – от 5 до 10.

Ключевые слова: Азовское море, Северный Каспий, штормовое волнение, динамическая нагрузка, припай, ледяные торосистые образования, районирование

Для цитирования: Яицкая Н.А. Районирование акваторий и берегов Азовского моря и Северного Каспия для оценки воздействия ансамблей опасных гидрометеорологических явлений // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 112–124. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-112-124>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20015, <https://rscf.ru/project/24-17-20015/>, а также при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-17-20015.

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

Original article

ZONING OF THE WATER AREAS AND SHORE OF THE SEA OF AZOV AND THE NORTHERN CASPIAN SEA TO ASSESS THE IMPACT OF HYDROMETEOROLOGICAL MULTI-HAZARDS

Natalia A. Yaitskaya

Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia
yaitskaya@gmail.com

Abstract. The article describes the results of a comprehensive geoecological zoning of the coast and water areas of the Sea of Azov and the Northern Caspian for the period from 2000 to 2020. The zoning is based on the following parameters: storm waves calculated by the author using the SWAN spectral wave model and based on

© Яицкая Н.А., 2025

the ERA-Interim global reanalysis; estimated values of the dynamic load on the coast from storm waves; fast ice and ice hummocks based on long-term observations. The threshold hazard values published in the regulatory documents of Roshydromet and relevant at the time of publication are taken as threshold values. The zoning is based on the allocation of coastal areas of the sea or open waters with a uniform impact of hazardous hydrometeorological phenomena and their combinations. The description of the areas is supplemented by published information on the geomorphology of the sea coasts and the rates of coastal abrasion from literary sources. Within the coastal zone of the Sea of Azov, 20 areas have been identified, the integral score of geoeological danger varies from 3 to 10. Within the coastal zone of the Northern Caspian, 9 areas have been identified, the integral score of geoeological danger varies from 5 to 10.

Keywords: Sea of Azov, Northern Caspian, storm waves, dynamic load, fast ice, ice hummocks, zoning

For citation Yaitskaya N.A. Zoning of the Water Areas and Shore of the Sea of Azov and the Northern Caspian Sea to Assess the Impact of Hydrometeorological Multi-Hazards. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):112-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-112-124>

Acknowledgments: the study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 24-17-20015, <https://rscf.ru/project/24-17-20015/>, and with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. 24-17-20015.

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

Введение

Азовское море и Северный Каспий имеют стратегическое геополитическое значение для прибрежных стран. Вся хозяйственная деятельность приморских районов ориентирована на близкое расположение морей и крупных дельт рек Дон и Волга. Косы Азовского моря, побережье Республики Дагестан и дельта Волги – популярные туристско-рекреационные зоны. Там же расположены города-порты. В Казахстане выделяется дельта р. Урал и находящийся выше по течению г. Атырау. Прибрежная область Республики Калмыкии и Республики Казахстан – полупустынные области, где практически отсутствуют населенные пункты и дороги любого значения. На побережьях морей расположено несколько особо охраняемых природных территорий (ООПТ) федерального и регионального значения. Многочисленные острова дельт Дона и Волги освоены и вовлечены в экономическую деятельность.

Рассматриваемые районы имеют ряд общих черт: средняя глубина составляет до 7 м; наличие одной крупной речной дельты (р. Дон и Волга); средняя соленость Азовского моря – около 13–14 ‰ [1–3], Северного Каспия – 5–8 [4]; наличие водообмена с акваторией с более высокой соленостью (Черное море и Средний Каспий); четко выражена сезонность времен года, лед наблюдается ежегодно с декабря по март. При этом для Северного Каспия характерен более континентальный климат, особенно в восточной части.

Важная проблема в исследуемом регионе – абразионно-оползневые процессы в прибрежной зоне, которые усиливаются долгопериодными изменениями уровня моря – в Азовском море с тенденцией к повышению, в Северном Каспии – межгодовые флуктуации с общей тенденцией к понижению в последнее десятилетие. В результате абразионно-оползневых процессов Россия и Казахстан ежегодно теряют сотни гектаров побережья [5], что приводит к безвозвратному изъятию ценных земель из сельскохозяйственного оборота, разрушению прибрежных хозяйственных и гидротехнических сооружений. В Азовском море с 70-х гг. XX в. разрушено до 50 м берега [6]. На некоторых створах, установленных специалистами Азовморинформцентра, в год отмечается потеря до 1,5 м берега. По прогнозам [6], с учетом повышения уровня Мирового океана и сохранения текущей скорости абразии, через 20 лет вследствие абразии в Ростовской области будет разрушено и снесено в море до 200 га земли. Прогнозируемый приблизительный ущерб, рассчитанный по кадастровым ценам 2021 г., для региона составит 148,7 млн р. В Краснодарском крае, согласно оценке сотрудников ЮИЦ РАН, в ближайшие 20 лет в результате деятельности моря будет разрушено 440 га побережья. Под угрозой находятся Щербиновский, Ейский, Приморско-Ахтарский и Темрюкский районы [6]. Приблизительная сумма ущерба составит 608 млн р.

К главным факторам разрушения берегов Азовского моря и Северного Каспия относится сочетание их геологического и геоморфологического строения с негативным штормовым и нагонным воздействием в безледный период. Особенно значительны проявления опасных процессов в зимний сезон [7], и при существующих тенденциях изменения климата [8] можно предположить, что количество опасных феноменов будет увеличиваться. При этом в наиболее штормовые зимние месяцы припайный лед может служить защитой для побережья, а в Каспийском море ледяной покров – ключевой элемент для размножения каспийского тюленя. Значимое воздействие на хозяйственные комплексы в прибрежной зоне оказывают ледяные торосистые образования [9, 10], которые образуются при полном промерзании моря, могут повреждать подводные объекты и изменять подводный рельеф, а также быть помехой при судоходстве.

Критерии опасности и неблагоприятности отдельных описанных опасных гидрометеорологических явлений (ОГЯ) регулярно публикуются в инструкциях по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями и перечнях и критериях ОГЯ региональных подразделений Росгидромета [11, 12]. Такие критерии незаменимы при предупреждении штормовых чрезвычайных ситуаций в региональном масштабе. Понимание пространственной локализации ОГЯ и их потенциального воздействия на берега и прибрежную инфраструктуру, а также получение целостного представления о рассматриваемых регионах возможны при объединении гидрометеорологических данных ретроспективного анализа на основе комплексного геоэкологического районирования.

Материалы и методы

В настоящей работе комплексное районирование побережий и акваторий Азовского моря и Северного Каспия объединило:

- ретроспективный анализ штормового волнения и динамической нагрузки на берег;
- данные наблюдений (авиаразведка и космоснимки) за припаем и ледяными торосистыми образованиями.

Для реанализа параметров ветрового волнения использована спектральная волновая модель третьего поколения SWAN, версия 41.31, разработанная в Технологическом университете Делфта [13]. Для Азовского и Каспийского морей сформированы исходные ряды информации с 1979 по 2020 г. в необходимых форматах: цифровые модели рельефа дна морей [14, 15]; скорость и направление ветра в виде наборов меридиональной (U) и зональной компонент (V) на высоте 10 м н.у.м. выбраны из реанализа European Centre for Medium-Range Weather Forecasts European Reanalysis ERA-Interim [16]. При расчетах волнения использована регулярная сетка и система вложенных расчетов [17–19]. В качестве пороговых значений опасности приняты опубликованные в [11, 12]. Сильным в Азовском море считается волнение с высотой волны 3,0 м и более, в Каспийском море – 4,0 м и более.

Расчет динамической нагрузки на берег основывается на работах [20, 21], где использованы эмпирические соотношения, учитывающие изменение профиля волны и ее обрушение на пологих откосах из [22, 23], а также соотношения, приведенные в [24, 25]. Параметры недеформированной ветровой волны конкретного моря (средняя длина волны, значительная высота и средний период волны) берутся из ближайшего по направлению нормали к берегу узла расчетной сетки SWAN. Цифровые модели рельефа дна применялись для определения углов наклона дна, координат узлов береговой линии и углов направления нормали к берегу.

Для нахождения нормали в окрестности каждого узла береговая линия аппроксимировалась прямолинейным участком. Для каждого такого участка составлялось уравнение прямой с угловым коэффициентом $y = a \cdot x + b$. Коэффициенты a и b устанавливались методом наименьших квадратов по координатам пяти соседних узлов береговой линии. Зная коэффициент a , величина которого равна тангенсу угла наклона береговой линии в узле, можно найти направление нормали. Далее определялись координаты точки, ближайшей к расчетному узлу. Параметры волн в ближайших узлах далее используются для расчета параметров волны при выходе на мелководье и величин ударных волновых нагрузок.

Информация о припае и ледяных торосистых образованиях получена из базы геоданных и геоинформационной системы (ГИС) «Ледовый режим южных морей России» [10, 26, 27]. ГИС содержит более 12 000 исторических наблюдений за параметрами ледяного покрова Азовского и

Каспийского морей с 1950 по 2025 г. – положение кромки льда, его сплоченность, сроки образования и разрушения льда, местоположение ледяных торосистых образований, сведения об опасных ледовых явлениях. В ходе исследования последних рассчитана вероятность возникновения припая и ледяных торосистых образований: акватории морей разделены на ячейки 10×10 км, далее для каждой ячейки выполнен расчет вероятности наличия ледяного покрова и припая для каждого месяца (ноябрь – апрель) по формуле [10] $P_k = \frac{N_k}{n_k} \times 100 \%$, где N_k – число встреч припая или ледяных торосистых образований; n_k – количество наблюдений в k -й ячейке.

В результате для всех ОГЯ получены ряды необходимой информации с 2000 по 2020 г.

Основой районирования стало выделение прибрежных участков моря или открытой акватории с однородным воздействием ОГЯ и их сочетаний. При районировании побережья припай оценивался как фактор, препятствующий разрушению берега, поэтому низкая вероятность появления припая у берега оценивалась максимальным баллом, высокая вероятность – минимальным.

Районирование побережья и акваторий Азовского моря и Северного Каспия по максимальному штормовому волнению, степени динамической нагрузки от штормового волнения, по вероятности встречи припая и ледяных торосистых образований выполнялось на основе кластерного анализа, который заключается в разбиении на однородные районы заданных по пространству значений. Алгоритм представляет собой итеративный процесс вычисления минимального евклидова расстояния при определении принадлежности к определенному кластеру каждого значения. После проверки статистической значимости кластеры с минимальными различиями стандартного отклонения были объединены. В результате экспериментов оптимальным для всех параметров оказалось выделение четырех классов степени геоэкологической опасности – низкая, средняя, высокая, очень высокая – с соответствующим присвоением баллов от 1 до 4.

Путем суммирования баллов определен интегральный балл и показатель геоэкологической опасности, составлены картосхемы районирования побережий и акваторий по степени геоэкологической опасности ансамблей ОГЯ и выполнено описание сочетаний видов геоэкологической опасности, характерных для районов Азовского моря и Северного Каспия.

Описание районов дополнено опубликованными сведениями о геоморфологии берегов морей и скоростями абразии из литературных источников [6, 28–35], результаты которых основаны на многолетних натуральных наблюдениях, и собственными данными наблюдений за 2024–2025 гг. В качестве идентификации границ при районировании побережья приняты населенные пункты или географические объекты (для Северного Каспия).

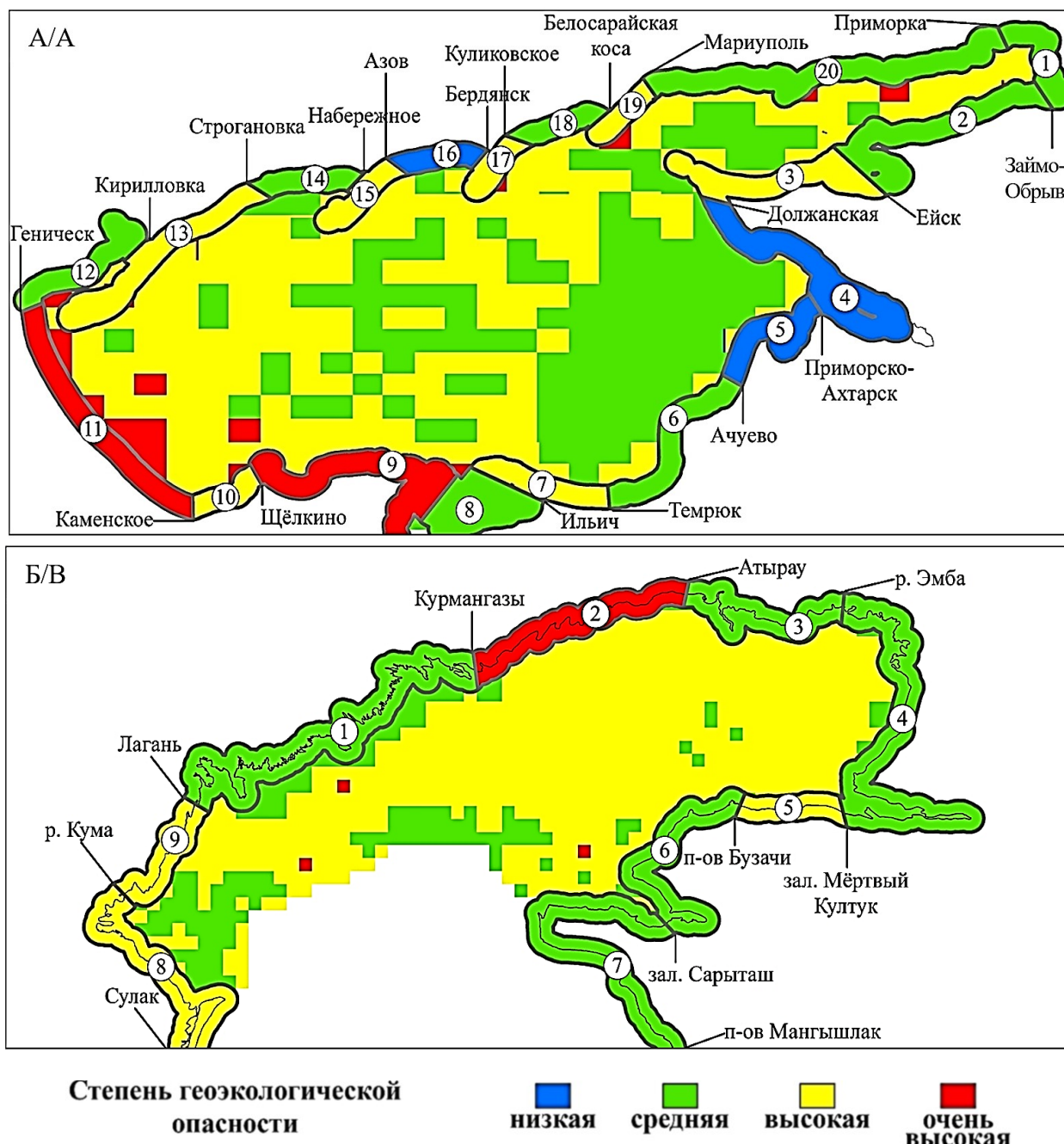
В пределах береговой зоны Азовского моря выделено 20 районов (рисунок А, табл. 1), интегральный балл геоэкологической опасности варьируется от 3 до 10. В пределах береговой зоны Северного Каспия выделено 9 районов (рисунок Б, табл. 2), интегральный балл геоэкологической опасности – от 5 до 10.

Результаты и обсуждение

Районирование побережья и акватории Азовского моря по степени геоэкологической опасности

Район Таганрогского залива от Мариуполя до Ейска, включая дельту Дона (районы 1, 2, 20). Характеризуется средним интегральным показателем геоэкологической опасности. Берега Таганрогского залива, за исключением кос и приустьевых областей мелких рек, являются обрывистыми и прямолинейными. Высота обрывов изменяется от 1,5–2 до 20–35 м. Полоса пляжей узкая, шириной 5–10 м, редко – до 20 м. Типы берегов в Таганрогском заливе абразионно-обвальные, абразионно-оползневые и аккумулятивные. Средняя скорость абразии для района 20 (северный берег Таганрогского залива) составляет 0,1–0,7 м/год, максимальная – 2,8 (х. Приазовский). Средняя скорость абразии для района 2 (южный берег Таганрогского залива) – 0,3–0,6 м/год, максимальная за многолетний период – 0,5 (х. Павло-Очаково). Необходимо отметить, что в период с 01.07.2024 по 20.01.2025 в районе с. Воронцовка была зафиксирована скорость абразии 2,27 м. Район 1 (дельта р. Дон) является аккумулятивной формой, перерезанной русловыми водотоками. Несмотря на то что высота волн здесь уже не достигает критических значений, динамическая нагрузка минимальна, а в зимние месяцы наблюдается устойчивый припай (самая высокая вероятность образо-

вания для всего моря), здесь часто отмечаются нагонные явления, что служит ключевым фактором в формировании рельефа побережья в этом районе. Динамическая нагрузка на берег составляет до 2 т·с/м². В дельте Дона расположена ООПТ регионального значения «Природный парк Донской». В устьевой области Дона находятся крупные порты и рыбохозяйственные предприятия, здесь ведется добыча полезных ископаемых. Таганрог и Мариуполь – крупные порты Таганрогского залива. В акватории Таганрогского залива осуществляется активная судоходная деятельность, прерываемая в особо суровые зимы (например, 2011/12 гг.) или во время штормовой активности (например, сентябрь 2014 г.).



Комплексное районирование побережья и акваторий Азовского моря (А) и Северного Каспия (Б) по степени геоэкологической опасности ансамблей опасных гидрометеорологических явлений / Complex zoning of the coast and water areas of the Sea of Azov (A) and the Northern Caspian (B) according to the degree of geoeological hazard of ensembles of dangerous hydrometeorological phenomena

Таблица 1 / Table 1

**Описание сочетаний видов геоэкологической опасности, характерных для районов Азовского моря
 / Description of combinations of types of geoeological hazards characteristic of the Azov Sea regions**

№ рай-она	Границы		Географический объект	Интегральный показатель геоэкологической опасности	Интегральный балл геоэкологической опасности	Степень динамического воздействия	Степень опасности припая	Степень проявления опасных ледовых явлений
	Начальная точка	Конечная точка						
20	Мариуполь	Приморка	Северное побережье Таганрогского залива	Средняя	6	Низкая	Низкая	Высокая
1	Приморка	Займо-Обрыв	Дельта р. Дон	Средняя	6	Низкая	Низкая	Высокая
2	Займо-Обрыв	Ейск	Южное побережье Таганрогского залива	Средняя	6	Средняя	Низкая	Средняя
3	Ейск	Должанская	Ейская коса, коса Долгая	Высокая	7	Очень высокая	Низкая	Низкая
4	Должанская	Приморско-Ахтарск	Ясенский залив, Бейсугский лиман	Низкая	3	Низкая	Низкая	Низкая
5	Приморско-Ахтарск	Ачуево	Лиман Ахтарский, лиманы	Низкая	3	Низкая	Средняя	Нет
6	Ачуево	Темрюк	Дельта р. Кубань, Темрюкский залив	Средняя	5	Низкая	Высокая	Низкая
7	Темрюк	Ильич	–	Высокая	8	Очень высокая	Очень высокая	Низкая
8	Ильич	Весёловка	Таманский п-ов	Средняя	6	Средняя	Средняя	Средняя
9	Заветное	Щёлкино	Керченский п-ов	Очень высокая	10	Очень высокая	Очень высокая	Средняя
10	Щёлкино	Каменское	Арабатский залив	Высокая	8	Средняя	Очень высокая	Высокая
11	Каменское	Геническ	Арабатская стрелка, залив Сиваш	Очень высокая	9	Высокая	Средняя	Очень высокая
12	Геническ	Кирилловка	Утлюкский лиман	Средняя	5	Средняя	Низкая	Средняя
13	Кирилловка	Строгановка	Коса Бирючий Остров, Молочный лиман	Высокая	7	Высокая	Средняя	Средняя
14	Строгановка	Набережное	Обиточный залив	Средняя	5	Средняя	Высокая	Нет
15	Набережное	Азов	Обиточная коса	Высокая	7	Высокая	Средняя	Низкая
16	Азов	Бердянск	Бердянский залив	Низкая	4	Средняя	Средняя	Нет
17	Бердянск	Куликовское	Бердянская коса	Высокая	8	Очень высокая	Средняя	Низкая
18	Куликовское	Белосарайская коса	Белосарайский залив	Средняя	5	Средняя	Средняя	Низкая
19	Белосарайская коса	Мариуполь	Белосарайская коса	Высокая	7	Высокая	Очень высокая	Средняя

Таблица 2 / Table 2

**Описание сочетаний видов геоэкологической опасности, характерных для районов
Северного Каспия / Description of combinations of types of geoeological hazards characteristic
of the regions of the Northern Caspian**

№ рай-она	Границы		Географи-ческий объект	Интегральный показатель гео-экологической опасности	Интегральный балл геоэколо-гической опас-ности	Степень динамиче-ского воз-действия	Степень опасности припая	Степень проявле-ния опас-ных ледо-вых явлен-ий
	Начальная точка	Конечная точка						
1	Лагань	Курмангазы	Дельта р. Волги	Средняя	5	Средняя	Средняя	Нет
2	Курмангазы	Атырау		Очень высокая	10	Очень высокая	Низкая	Очень высокая
3	Атырау	Устье р. Эмбы	От устья р. Урал до устья р. Эмбы	Средняя	6	Средняя	Низкая	Высокая
4	Устье р. Эмбы	Залив Мёртвый Култук	Восточное по-бережье Север-ного Каспия, залив Мёртвый Култук	Средняя	5	Низкая	Средняя	Средняя
5	Зал. Мёрт-вый Култук	П-ов Бузачи	–	Высокая	8	Очень высокая	Низкая	Высокая
6	П-ов Бузачи	Залив Сарыгаш	П-ов Бузачи	Средняя	5	Средняя	Низкая	Средняя
7	Залив Сарыгаш	П-ов Мангышлак	П-ов Мангышлак	Средняя	6	Высокая	Высокая	Нет
8	Сулак	Устье р. Кумы	Кизлярский залив, Аграхан-ский залив, о. Чечень	Высокая	8	Очень высокая	Очень высокая	Нет
9	Устье р. Кумы	Лагань		Высокая	8	Высокая	Низкая	Высокая

Примечание. Пунктиром обозначены границы между районами, которые в результате комплексной оценки геоэкологической опасности предлагается объединить. Цвет заливки в таблице соответствует цвето-вому обозначению района на рисунках А и Б

Район от Ейска до Должанской, включая косу Долгую (район 3). Характеризуется высоким интегральным показателем геоэкологической опасности с интегральным баллом 7. Берега – преимущественно абразионные, побережья косы Долгой и Ейской косы – аккумулятивные формы. Скорость абразии составляет от 0,4 до 1,7 м/год. Ключевыми факторами опасности здесь выступают нагонные и штормовые явления. Динамическая нагрузка на берег составляет в среднем 6 т·с/м², максимум – 11. Коса Долгая – ООПТ регионального значения. Ейск и Должанская – зона рекреации и туризма в теплое время года.

Район от Должанской до Ачуево (районы 4, 5) – низкий интегральный показатель геоэкологической опасности (интегральный балл – 3). Для прибрежного района характерны минимальные значения степени геоэкологической опасности для всех рассматриваемых показателей, в южной части района опасные ледовые явления не наблюдаются вообще. Район 4 (от косы Долгой до Приморско-Ахтарска) характеризуется абразионным берегом, перемежающимся с отмершим береговым обрывом. Северное побережье Бейсугского лимана – аккумулятивный берег. Для района 4 характерны большие скорости абразии – до нескольких метров в год. В районе 5 (от Приморско-Ахтарска до Ачуево) берега преимущественно аллювиально-морские, лишь в районе Приморско-Ахтарска – абразионные. Максимальные скорости абразии составляют от 2,5 м/год в районе Приморско-Ахтарска до 4 (западный берег Должанской косы) и 6,2 м/год (участок Морозовский), в среднем – 3,7. Динамическая нагрузка на берег минимальна и составляет до 1 т·с/м². В районе Ахтарского лимана ледяные торосистые образования не возникали с 2000 г.

Район от Ачуево до Темрюка, включая дельту р. Кубань (район 6). Средний интегральный показатель геоэкологической опасности (интегральный балл – 5). Берег аллювиально-морской. Район представляет собой систему гирл и лиманов. Протяженность дельтовой равнины р. Кубань составляет 150 км, а морского края дельты – 34 км. Рельеф представлен сложным сочетанием береговых баров и приустьевых валов. Средняя скорость размыва берега составляет 1–2 м/год, достигая 5–7. Динамическая нагрузка на берег – от 2 до 6 т·с/м². Здесь высока вероятность образования припая. В этом районе расположена ООПТ «Приазовский государственный природный заказник», крупный порт Темрюк.

Район от Темрюка до Ильича (район 7). Небольшой район, при этом показатели существенно отличаются от соседних районов. Интегральный показатель геоэкологической опасности – высокая степень опасности, интегральный балл – 8. Берег абразионный и абразионно-оползневой. Рельеф представляет собой плоские низменные равнины, разделяющие возвышенности. Наиболее пониженные участки заняты лиманами, отделенными от моря пересыпями. У основания оползней сформированы пляжи шириной 5–15 м. Максимальная скорость абразии составляет 0,025–0,6 м/год. Динамическая нагрузка на берег – от 10 т·с/м² и более. В прибрежной зоне возможно образование припая и опасных торосистых образований.

Район от Ильича до Весёловки (район 8). Восточное побережье Керченского пролива. Интегральный показатель геоэкологической опасности средний (6 баллов). Берег абразионно-оползневой с аккумулятивными формами (косы). Часто возникают штормовые явления. Лед и припай образуются в суровые и очень суровые зимы. Динамическая нагрузка колеблется в пределах от 4 до 6 т·с/м² в зависимости от конкретного участка берега. Это рекреационная зона, на побережье Таманского п-ова расположены грязевые вулканы и ООПТ федерального значения. Стратегически важный объект – Крымский мост.

Район от Заветного до Геническа (Керченский полуостров и коса Арабатская Стрелка) (районы 9, 10, 11). Высокий и очень высокий интегральный показатель геоэкологической опасности (интегральный балл – 8 для района 10, 9 и 10 – для остальной территории). Тип берега абразионно-обвальный на юго-западе, абразионно-оползневой и оползневой на востоке и северо-востоке Керченского п-ова, аккумулятивный берег представлен на пересыпях и косах. Береговая линия сильно изрезана. Ширина пляжей колеблется от 15 до 70 м. Наблюдения за абразией ведутся на отдельных участках. Максимальная скорость составляет для побережья Керченского пролива района 9 – до 1,5 м/год, Казантипского залива района 9 – до 1,9, района 10 – 0,3 м/год. Здесь часто отмечаются штормовые явления. Лед и припай формируются в суровые и очень суровые зимы, часто наблюдается возникновение ледяных торосистых образований, торосов и гряд торосов. Динамическая нагрузка на берег достигает на побережье Керченского пролива максимальных значений – более 11 т·с/м², на остальном участке – от 4 до 11 т·с/м². Именно такое сочетание – ежегодное замерзание моря и высокая динамическая нагрузка – предопределило высокую геоэкологическую опасность. На побережье Керченского пролива расположен крупный порт – Керчь. В пределах районов 9–11 находится большое количество природных парков и заказников федерального и регионального значения. Наиболее известные: на косе Арабатская Стрелка – государственный природный заказник «Арабатский», на мысе Казантип – Казантипский морской заказник федерального значения. Керченский полуостров, так же как и Таманский, – зона активного отдыха.

Все лиманы и заливы северного побережья Азовского моря (районы 12, 14, 16, 18) (Утлюкский лиман, Обиточный лиман, Бердянский залив, Белосарайский залив). Характеризуются низким и средним интегральным показателем опасности (интегральный балл – 4, 5). Берег абразионный и абразионно-оползневой. В районе Обиточного и Бердянского заливов ледяные торосистые образования возникают очень редко. Динамическая нагрузка составляет от 3 до 6 т·с/м². Северное побережье моря – густонаселенный район, где имеется ряд ООПТ федерального и регионального значения.

Косы северного побережья Азовского моря (районы 13, 15, 17, 19) (коса Бирючий Остров, Обиточная коса, Бердянская коса, Белосарайская коса) отличаются высоким интегральным показателем опасности (интегральный балл – 7, 8). Эти аккумулятивные объекты чувствительны к любым гидродинамическим воздействиям, здесь расположено наибольшее количество объектов рекреации, а штормовые нагоны, навалы льда на берег и продолжительное стояние припая наиболее опасны для этих районов.

Районирование побережья и акватории Северного Каспия по степени геоэкологической опасности

Дельта р. Волги (район 1) характеризуется средним интегральным показателем геоэкологической опасности (интегральный балл – 5). Район отличается протяженностью территории, существенное влияние на гидрологический режим которой оказывают сгонно-нагонные явления, усугубляющиеся динамической нагрузкой от штормового волнения, в суровые зимы приустьевой участок дельты Волги покрыт льдом. Дельта Волги представляет собой аккумулятивную форму, перерезанную сетью дельтовых протоков и гирл. При понижении уровня Каспийского моря в дельте могут возникать эрозионные борозды с косами и островками. Также вследствие динамики уровня моря возникают слабопроточные участки – култуки. Максимальная динамическая нагрузка достигает $5 \text{ т}\cdot\text{с}/\text{м}^2$. В открытой части моря – высокая и очень высокая опасность возникновения торосов. Является крупным ООПТ Государственный природный биосферный заповедник и водно-болотное угодье международного значения. В дельте ведется активная экономическая деятельность. Здесь проходит судоходный Волго-Каспийский канал, соединяющий Каспийское море с портами Оля и Астрахань.

Район от Курмангазы до Атырау (район 2). Единственный район в Северном Каспии с очень высокой степенью геоэкологической опасности (интегральный балл геоэкологической опасности – 10), обусловленный очень высокой степенью динамической нагрузки и проявления опасных ледовых явлений как в прибрежной части, так и в открытом море. Берега в пределах района – сильно отмельные, осушные и неровные. На побережье практически отсутствуют населенные пункты и дороги.

Район от устья р. Урал до залива Мертвый Култук (районы 3, 4). Характеризуется средним интегральным показателем геоэкологической опасности (балл – 5, 6). Прибрежные районы представляют собой плоскую равнину с практически нулевыми уклонами. Север района 4 – равнина древней р. Эмбы, разделенная руслами сухих протоков. Их современная связь с морем осуществляется только во время сильных нагонов. Абразия здесь практически отсутствует. Отличительная особенность этого района – средняя и высокая степень проявления опасных ледовых явлений. Практически ежегодно образуется лед и припай. Динамическая нагрузка на берег здесь минимальна и составляет до $1 \text{ т}\cdot\text{с}/\text{м}^2$. На побережье района отсутствуют крупные населенные пункты, проходят судоходные пути в Казахстан. В прибрежной зоне района 3 расположен Государственный природный резерват Акжайык.

Район от залива Мертвый Култук до п-ова Бузачи (район 5). Характеризуется высоким интегральным показателем геоэкологической опасности (интегральный балл – 8). Берега в пределах района являются сильно отмельными, осушными и неровными. Практически ежегодно образуется лед и припай. Динамическая нагрузка максимальная и составляет $12 \text{ т}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ и более, степень проявления опасных ледовых явлений – высокая.

Район от п-ова Бузачи до п-ова Мангышлак включительно (районы 6, 7). Средний интегральный показатель геоэкологической опасности (интегральный балл – 5, 6). Рельеф отличается сложным строением. В районе залива Сарыташ и Форта-Шевченко расположены выровненные берега с примкнувшей аккумулятивной террасой. Рельеф п-ова Тюб-Караган характеризуется абразионно-аккумулятивными формами, перемежающимися с выровненными лагунными участками. Ледяной покров образуется в суровые зимы. В районе побережья Мангышлакского п-ова опасные ледовые явления отсутствуют, но могут наблюдаться в районе акватории, прилегающей к району. Динамическая нагрузка колеблется от средних ($3\text{--}5 \text{ т}\cdot\text{с}/\text{м}^2$) до максимальных ($12 \text{ т}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ и более) значений в зависимости от конфигурации побережья.

Район от Сулака до Лагани (районы 8, 9). *Западное побережье Северного Каспия*. Весь район выделяется высоким интегральным показателем геоэкологической опасности (интегральный балл – 8). В районе Аграханского п-ова (южная оконечность района 8) выровненные лагунные берега с развитой сетью протоков в междуречье Старого Терека и Терека. Основная часть района 8 относится к сильно отмельным, осушным, неровным берегам, подверженным абразионным процессам. Для района 9 характерны обширные отмельные аккумулятивные побережья. Очень высокая степень динамического воздействия (более $12 \text{ т}\cdot\text{с}/\text{м}^2$) и опасности припая в сочетании с абразионно-оползневым или аккумулятивным типом берега. На побережье и в акватории располо-

жена сеть федеральных и региональных ООПТ. Наиболее значимые – Дагестанский государственный природный заповедник «Кизлярский залив», Аграханский заказник. От Сулака на север в пределах Республики Дагестан – густонаселенный район с развитой сетью автомобильных дорог и туристско-рекреационными зонами.

Заключение

Впервые системно для акваторий и берегов Азовского моря и Северного Каспия ОГЯ и степень их воздействия рассматриваются в комплексе. Для пространственной оценки степени геоэкологической опасности ОГЯ и определения уязвимости прибрежных геосистем от их возникновения выполнено комплексное районирование побережья и акваторий Азовского моря и Северного Каспия по величине риска ансамблей ОГЯ, объединившее результаты балльной оценки ОГЯ, районирования по максимальному штормовому волнению, степени динамической нагрузки от штормового волнения, вероятности встречи припая и ледяных торосистых образований. В результате проведенного комплексного районирования Азовского моря и Северного Каспия по величине риска ансамблей ОГЯ получены значения интегрального балла и показателя геоэкологической опасности по выделенным районам. Для каждого района определен ключевой показатель, который вносит наибольший вклад в интегральную оценку. Выполнено описание районов и ключевых объектов природы и инфраструктуры, на которые ОГЯ оказывают наибольшее воздействие. Районирование может стать основой для регионального экологического и экономического планирования акваторий и прибрежных территорий.

Список источников

1. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Динамика и термохалинная структура вод контактных зон Азовского моря // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 502, № 2. С. 107–114. EDN: PTQMST. <https://doi.org/10.31857/S2686739722020116>
2. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Чеха М.М., Алешина Е.Г. Мониторинг гидрохимических преобразований на взморье Дона в реальном времени // Наука Юга России. 2023. Т. 19, № 2. С. 20–32. EDN: YBVTSU. <https://doi.org/10.7868/S25000640230204>
3. Бердников С.В., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В. Причины стремительного роста солености воды Азовского моря в XXI веке // Морской гидрофиз. журн. 2023. Т. 39, № 6 (234). С. 760–778. EDN: QPFZZT.
4. Яицкая Н.А. Термохалинный режим Каспийского моря при изменении уровня: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2012. 28 с. EDN: QIIWRX.
5. Разумов В.В., Глушко А.Я. Деградация земель прибрежной территории субъектов юга России под воздействием абразионных процессов // Вестн. Московского гос. обл. ун-та. Естеств. науки. 2010. № 3. С. 112–119. EDN: NCINMV.
6. Бердников С.В., Беспалова Л.А., Хаванский А.Д., Хорошев О.А., Магаева А.А., Мисиров С.А., Мерина Ю.Ю., Кулыгин В.В., Цыганкова А.Е., Иошпа А.Р., Сорокина В.В., Лихтанская Н.В., Булышева Н.И., Шохин И.В., Савикин А.И., Оганесян А.А., Смирнова Е.А. Опасные абразионные и оползневые процессы в береговой зоне Азовского моря и социально-экономические последствия их проявлений. Ростов н/Д.: ЮНЦ РАН, 2022. 288 с. EDN: WQRSKR.
7. Авакова А.Г., Беспалова Л.А., Иошпа А.Р., Цыганкова А.Е. Опасные погодные явления на побережье Азовского и Черного морей // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 4. С. 54–63. EDN: VPUFYU. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2018-4-54-63>
8. Назаренко О.В. Изменение некоторых метеорологических показателей в бассейне Азовского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 1. С. 62–70. EDN: SXLAPB. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-1-62-70>
9. Огородов С.А., Архипов В.В. Экзарация дна Каспийского моря ледяными торосистыми образованиями // Докл. АН. 2010. Т. 432, № 3. С. 403–407. EDN: MSRBKL.
10. Магаева А.А. Ледовый режим Азовского и Каспийского морей: многолетняя динамика и опасные явления: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2022. 162 с.
11. РД 52.04.563-2013. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями. СПб.: Гл. геофиз. обсерватория, 2013. 53 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200109275> (дата обращения: 01.07.2025).
12. Приложение к «Положению об опасных природных гидрометеорологических явлениях», утвержденному приказом ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» от 12.05.2023 № 70 (с изм. от 21.12.2023 № 211). URL: <https://yugmeteo.donpac.ru/export/sites/default/.galleries/docs/criteria.pdf> (дата обращения: 01.07.2025).

13. SWAN. URL: <http://www.swan.tudelft.nl> (дата обращения: 01.07.2025).
14. Яицкая Н.А. Результаты ретроспективного анализа ветрового волнения в Азовском море (на примере зим 2015–2017 гг.) // Наука Юга России. 2017. Т. 13, № 4. С. 60–70. EDN: ZVNZMX. <https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-3-4-60-70>
15. Яицкая Н.А., Швердяев И.В., Магаева А.А., Бригида В.С. Реконструкция опасных нагонов в Северном Каспии на основе цифровых моделей рельефа дна и гидрологического моделирования // Наука Юга России. 2021. Т. 17, № 3. С. 18–29. EDN: NOJBTM. <https://doi.org/10.7868/S25000640210303>
16. The ERA-Interim archive Version 2.0. URL: <http://www.ecmwf.int/node/8174> (дата обращения: 01.07.2025).
17. Yaitskaya N. The Wave Climate of the Sea of Azov // Water. 2022. Vol. 14, № 4. Art. 555. EDN: LXDGCW. <https://doi.org/10.3390/w14040555>
18. Лопатухин Л.И., Яицкая Н.А. Адаптация гидродинамических моделей для расчета режима волнения Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 54–61. EDN: UNZOFE.
19. Яицкая Н.А. Ретроспективный анализ ветрового волнения в Каспийском море во второй половине XX – начале XXI в. и связь с региональными проявлениями изменения климата // Геогр. вестн. 2017. № 2 (41). С. 57–70. EDN: YTOQKL. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-2-57-70>
20. Кушнир В.М., Душко В.Р., Крамарь В.А. Воздействие поверхностных гравитационных волн на прибрежные океанотехнические сооружения // Вост.-европ. журн. передовых технологий. 2013. Т. 6, № 5 (66). С. 36–41. EDN: RUJLRZ.
21. Федоров С.В. Программный модуль прогноза ударных нагрузок от действия волн на берега Азовского моря // Экол. безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 2. С. 75–80. EDN: WKTOQB.
22. Смирнов А.А. Изменение высоты и длины волны на пологих откосах // Волновые исследования. М.: Госстройиздат, 1962. С. 37–60.
23. Смирнов А.А. Глубина обрушения волны на пологих откосах // Волновые исследования. М.: Госстройиздат, 1962. С. 177–184.
24. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: АН СССР, 1953. 989 с.
25. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): М., 2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000256> (дата обращения: 01.07.2025).
26. Яицкая Н.А., Магаева А.А. Динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI в. // Лед и снег. 2018. Т. 58, № 3. С. 373–386. EDN: VPYVNM. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-373-386>
27. Яицкая Н.А., Магаева А.А. Ледовый режим Северного Каспия // Вестн. Московского ун-та. География. 2020. № 6. С. 63–72. EDN: UUGNVQ.
28. Мисиров С.А., Беспалова Л.А., Магаева А.А., Беспалова Е.В. Исследование овражно-балочной сети южного берега Таганрогского залива с использованием беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4. С. 77–83. EDN: BWCPDF. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-4-77-83>
29. Артюхин Ю.В., Федоров С.И., Артюхина О.И. Геоморфологические аспекты возможных негативных последствий добычи нефти в береговой зоне юго-восточной части Азовского моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. № 9. С. 39–46. EDN: HVKUDN.
30. Архипова О.Е., Бульшева Н.И., Гаргона Ю.М., Голубева Н.И., Инжебейкин Ю.И., Ковалева Г.В., Кондаков А.А., Красноруцкая К.В., Лебедева Н.В., Лужняк В.А., Набоженко М.В., Панасюк Н.В., Савицкий Р.М., Саятин В.В., Сорокина В.В., Степаньян О.В., Титов В.В., Толочко И.В., Шохин И.В. Экологический атлас Азовского моря. Ростов н/Д.: ЮНЦ РАН, 2011. 328 с. EDN: RTTGET.
31. Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Цыганкова А.Е. Берега Азовского моря: 100 лет наблюдений. Ростов н/Д.: ЮНЦ РАН, 2023. 364 с.
32. Леонтьев О.К., Маев Е.Г., Рычагов Г.И. Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М.: Московский ун-т, 1977. 208 с.
33. Лукьянова С.А. Типы берегов Каспийского моря // Комплексные исследования Каспийского моря. 1979. Вып. 6. С. 28–34.
34. Матишов Г.Г. Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестн. ЮНЦ РАН. 2006. Т. 2, № 1. С. 44–48. EDN: KVVSSX.
35. Yaitskaya N., Magaeva A. Wind, Wave, And Ice Impacts on the Coastal Zone of the Sea of Azov // Water. 2025. Vol. 17, № 1. Art. 36. EDN: HDUNMR. <https://doi.org/10.3390/w17010036>

References

1. Matishov G.G., Grigorenko K.S. Dynamics and thermohaline structure in the contact zones of the Azov Sea. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2022;502(1-2):51-58. EDN: STCPKH. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22020118>

2. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Chekha M.M., Aleshina E.G. Monitoring of hydrochemical transformations on the Don seashore in real time. *Science in the South of Russia*. 2023;19(2):20-32. (In Russ.). EDN: YBVTSU. <https://doi.org/10.7868/S25000640230204>
3. Berdnikov S.V., Kulygin V.V., Dashkevich L.V. Causes of the rapid increase in salinity of the Azov Sea in the 21st century. *Marine Hydrophysical J.* 2023;39(6):760-778. (In Russ.). EDN: QPFZZT.
4. Yaitskaya N.A. *Thermohaline regime of the Caspian Sea with level changes*. Abstract of PhD thesis. Murmansk, 2012. 28 p. (In Russ.). EDN: QIIWRX.
5. Razumov V.V., Glushko A.Ya. Degradation of coastal lands of the subjects of the south of Russia under the influence of abrasion processes. *Bulletin of the Moscow State Regional University. Natural Sciences*. 2010;(3):112-119. (In Russ.). EDN: NCINMV.
6. Berdnikov S.V., Bepalova L.A., Khavansky A.D., Khoroshev O.A., Magaeva A.A., Misirov S.A., Merinova Yu.Yu., Kulygin V.V., Tsygankova A.E., Ioshpa A.R., Sorokina V.V., Likhtanskaya N.V., Bulysheva N.I., Shokhin I.V., Savikin A.I., Oganessian A.A., Smirnova E.A. *Dangerous abrasion and landslide processes in the coastal zone of the Azov Sea and the socio-economic consequences of their manifestations*. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2022. 288 p. (In Russ.). EDN: WQRSKR.
7. Avakova A.G., Bepalova L.A., Ioshpa A.R., Tsygankova A.E. Dangerous weather phenomena on the coast of the Azov and Black Seas. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Science*. 2018;(4):54-63. (In Russ.). EDN: VPUFY. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2018-4-54-63>
8. Nazarenko O.V. Changes in some meteorological indicators in the Azov Sea basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Science*. 2020;(1):62-70. (In Russ.). EDN: SXLAPB. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-1-62-70>
9. Ogorodov S.A., Arkhipov V.V. Exaration of the Caspian Sea bottom by ice hummocky formations. *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2010;432(3):403-407. (In Russ.). EDN: MSRBKL.
10. Magaeva A.A. *Ice regime of the Azov and Caspian Seas: long-term dynamics and hazardous phenomena*. PhD thesis. Moscow, 2022. 162 p. (In Russ.).
11. *Instructions for the preparation and transmission of storm messages by observation units*. Guidance document RD 52.04.563-2013. Saint Petersburg: Main Geophysical Observatory Press; 2013. 53 p. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200109275> [Accessed 1st July 2025]. (In Russ.).
12. *Appendix to the "Regulations on the dangerous natural hydrometeorological phenomena", approved by the order of the North Caucasus Office of the Hydrometeorological Service dated 12.05.2023 No. 70 (as amended on 21.12.2023 No. 211)*. Available from: <https://yugmeteo.donpac.ru/export/sites/default/.galleries/docs/criteria.pdf> [Accessed 1st July 2025]. (In Russ.).
13. *SWAN*. Available from: <http://www.swan.tudelft.nl> [Accessed 1st July 2025].
14. Yaitskaya N.A. The results of hindcasting experiments of wind wave in the Sea of Azov (as illustrated by winters 2015-2017). *Science in the South of Russia*. 2017;13(4):60-70. (In Russ.). EDN: ZVNZMX. <https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-3-4-60-70>
15. Yaitskaya N.A., Sheverdyaev I.V., Magaeva A.A., Brigida V.S. Reconstruction of dangerous surges in the Northern Caspian based on digital elevation models and hydrological modeling. *Science in the South of Russia*. 2021;17(3):18-29. (In Russ.). EDN: NOJBTM. <https://doi.org/10.7868/S25000640210303>
16. *The ERA-Interim archive Version 2.0*. Available from: <http://www.ecmwf.int/node/8174> [Accessed 1st July 2025].
17. Yaitskaya N. The Wave Climate of the Sea of Azov. *Water*. 2022;14(4):555. EDN: LXDGCW. <https://doi.org/10.3390/w14040555>
18. Lopatukhin L.I., Yaitskaya N.A. Peculiarities of the approach to calculation of wind waves in the Caspian Sea. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2018;43(4):245-250. EDN: XXEVQT. <https://doi.org/10.3103/S1068373918040052>
19. Yaitskaya N.A. Retrospective analysis of wind waves in the Caspian Sea in the second half of the 20th - beginning of the 21st century and its connection with the regional climate changes. *Geographical Bulletin*. 2017;(2):57-70. (In Russ.). EDN: YTOQKL. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-2-57-70>
20. Kushnir V.M., Dushko V.R., Kramar V.A. Impact of surface gravity waves on coastal ocean engineering structures. *East European J. of Advanced Technologies*. 2013;6(5):36-41. (In Russ.). EDN: RUJLRZ.
21. Fedorov S.V. Software module for forecasting impact loads from wave action on the shores of the Azov Sea. *Environmental Safety of the Coastal and Shelf Zones of The Sea*. 2016;(2):75-80. (In Russ.). EDN: WKTQQB.
22. Smirnov A.A. Change in wave height and length on gentle slopes. *Wave studies*. Moscow: State Building Publishing House; 1962:37-60. (In Russ.).
23. Smirnov A.A. Wave breaking depth on gentle slopes. *Wave studies*. Moscow: State Building Publishing House; 1962:177-184. (In Russ.).
24. Shuleikin V.V. *Physics of the Sea*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1953. 989 p. (In Russ.).

25. *Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships)*. SNiP 2.06.04-82. Moscow, 2012. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200000256> [Accessed 1st July 2025]. (In Russ.).
26. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Dynamics of the ice regime of the Sea of Azov in the 20th-21st centuries. *Ice and Snow*. 2018;58(3):373-386. (In Russ.). EDN: VPYVNM. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-373-386>
27. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Ice regime of the Northern Caspian Sea. *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*. 2020;(6):63-72. (In Russ.). EDN: UUGNVQ.
28. Misirov S.A., Bepalova L.A., Magaeva A.A., Bepalova E.V. Study of the gully network of the southern coast of Taganrog Bay using unmanned aerial vehicles. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Science*. 2019;(4):77-83. (In Russ.). EDN: BWCPDF. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-4-77-83>
29. Artyukhin Yu.V., Fedorov S.I., Artyukhina O.I. Geomorphological aspects of possible negative consequences of oil production in the coastal zone of the south-eastern part of the Sea of Azov. *Environmental Protection in the Oil and Gas Complex*. 2006;(9):39-46. (In Russ.). EDN: HVKUDN.
30. Arkhipova O.E., Bulysheva N.I., Gargopa Yu.M., Golubeva N.I., Inzhebeykin Yu.I., Kovaleva G.V., Kondakov A.A., Krasnorutskaya K.V., Lebedeva N.V., Luzhnyak V.A., Nabozhenko M.V., Panasyuk N.V., Savitsky R.M., Sayapin V.V., Sorokina V.V., Stepanyan O.V., Titov V.V., Tolochko I.V., Shokhin I.V. *Ecological atlas of the Sea of Azov*. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2011. 328 p. (In Russ.). EDN: RTTGET.
31. Bepalova L.A., Ivlieva O.V., Tsygankova A.E. *Shores of the Sea of Azov: 100 years of observations*. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2023. 364 p. (In Russ.).
32. Leontiev O.K., Maev E.G., Rychagov G.I. *Geomorphology of the shores and bottom of the Caspian Sea*. Moscow: Moscow University Press; 1977. 208 p. (In Russ.).
33. Lukyanova S.A. Types of Caspian Sea shores. *Comprehensive Studies of the Caspian Sea*. 1979;(6):28-34. (In Russ.).
34. Matishov G.G. Geomorphological features of the shelf of the Sea of Azov. *Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2006;2(1):44-48. (In Russ.). EDN: KVVSSX.
35. Yaitskaya N., Magaeva A. Wind, Wave, And Ice Impacts on the Coastal Zone of the Sea of Azov. *Water*. 2025;17(1):36. EDN: HDUNMR. <https://doi.org/10.3390/w17010036>

Информация об авторе

Н.А. Яицкая – кандидат географических наук, заместитель директора по науке ФНЦ СИЦ РАН.

Information about the authors

N.A. Yaitskaya – Candidate of Science (Geography), Deputy Director for Science, FRC SSC of the RAS.

Статья поступила в редакцию 06.07.2025; одобрена после рецензирования 09.10.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 06.07.2025; approved after reviewing 09.10.2025; accepted for publication 11.11.2025.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 631.41: 631.416: 631.422

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-125-131>

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ NO-TILL НА ФОСФАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМОВ ОБЫКНОВЕННЫХ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Ольга Александровна Бирюкова^{1✉}, *Ярослав Ильич Ильченко*²,
*Владимир Александрович Ерин*³

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

¹olga_alexan@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9748-3296>

²I0yaroslav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5498-3538>

³verin@srfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0960-3292>

Аннотация. Фосфатное состояние почв является одним из важнейших элементов, определяющих продуктивность и устойчивость агроценозов. Изучено влияние технологии no-till на содержание валового фосфора и фракционный состав минеральных фосфатов черноземов обыкновенных. Исследование проведено в производственных условиях на базе ЗАО им. Кирова (Песчанокопский район, Ростовская область). Образцы почв отобраны в посевах озимой пшеницы, выращиваемой по технологии no-till. Для сравнения анализировали почву, возделываемую по традиционной технологии. Эталонной была почва целинных участков. Фракционный состав минеральных фосфатов в почве определяли по методу Гинзбург – Лебедевой, валовой фосфор – с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Установлено, что применение технологии no-till способствует накоплению валовых фосфатов в верхнем горизонте чернозема обыкновенного до 0,19 %, при традиционной технологии, основанной на отвальной вспашке, – 0,15 %. В сравнении с целинной выявлено увеличение суммы минеральных фосфатов по обеим технологиям. Однако в пахотном черноземе повышаются фракции Са-PI и Са-PII, а при нулевой технологии – Al-P и Fe-P. Результаты исследования целесообразно использовать при диагностике фосфатного состояния почв и разработке эффективных приемов повышения их плодородия.

Ключевые слова: чернозем обыкновенный, no-till, вспашка, валовой фосфор, фракционный состав, минеральные фосфаты

Для цитирования: Бирюкова О.А., Ильченко Я.И., Ерин В.А. Влияние технологии no-till на фосфатное состояние черноземов обыкновенных Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 125–131. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-125-131>

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FENW-2024-0001) на оборудовании ЦКП «Биоинженерия почв» (соглашение № 075-15-2025-667).

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

Original article

IMPACT OF NO-TILL TECHNOLOGY ON THE PHOSPHATE STATUS OF HAPLIC CHERNOZEMS IN ROSTOV REGION

Olga A. Biryukova^{1✉}, Yaroslav I. Ilchenko², Vladimir A. Erin³

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

¹olga_alexan@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9748-3296>

²10yaroslav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5498-3538>

³verin@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0960-3292>

Abstract. Phosphate status of soils is one of the most important elements determining the productivity and sustainability of agricultural ecosystems. The influence of no-till technology on the total phosphorus content and fractional composition of mineral phosphates in ordinary chernozems was studied. The research was conducted under production conditions at the Kirov Agricultural Enterprise (Peshchanokopsky District, Rostov Region). Soil samples were taken from winter wheat crops grown using no-till technology. For comparison, soil cultivated using traditional technology was analyzed, with virgin soil serving as a baseline. The fractional composition of mineral phosphates in the soil was determined by the Ginsburg-Lebedeva method, and total phosphorus was determined by X-ray fluorescence analysis. It was found that the application of no-till technology promotes the accumulation of total phosphates in the upper horizon of ordinary chernozem up to 0.19 %, compared to 0.15 % under traditional moldboard plowing technology. Compared to virgin land, an increase in the total amount of mineral phosphates was revealed under both technologies. However, in the plowed chernozem, the fractions of Ca-PI and Ca-PII increase, while under no-till, the fractions of Al-P and Fe-P increase. The research results are advisable for use in diagnosing the phosphate status of soils and developing effective methods for enhancing their fertility.

Keywords: haplic chernozem, no-till, moldboard plowing technology, total phosphorus, fractional composition, mineral phosphates

For citation: Biryukova O.A., Ilchenko Ya.I., Erin V.A. Impact of No-Till Technology on the Phosphate Status of Haplic Chernozems in Rostov Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):125-131. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-125-131>

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FENW-2024-0001) using the equipment of the center of collective use "Soil Bioengineering" (Agreement No. 075-15-2025-667).

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

Введение

Обеспечение продовольственной безопасности государства неразрывно связано с качеством жизни населения и напрямую зависит от устойчивого развития земледелия [1]. В условиях европейской части юга России преобладание традиционных технологий выращивания сельскохозяйственных культур не дает возможности поддерживать устойчивое развитие агроценозов в связи с интенсивным развитием процессов деградации почв (водная и ветровая эрозия, дегумификация, агроистощение, засоление) [2].

Одним из перспективных направлений стабилизации сельского хозяйства является внедрение почвозащитных ресурсосберегающих технологий, в частности технологии no-till [3]. Данная система земледелия, основанная на минимизации механического нарушения почвы, сохранении постоянного растительного покрова и использовании диверсифицированных севооборотов, способствует повышению продуктивности и рентабельности сельскохозяйственного производства, его адаптации к изменению климата, а также сохранению и расширению экосистемных функций почв [4]. Переход на нулевую технологию вносит существенные коррективы в биохимические циклы питательных элементов в почве, что обусловило необходимость детального изучения

трансформации элементов питания. Фосфор – один из наиболее важных элементов питания для растений. Он играет решающую роль в таких жизненно важных процессах, как фотосинтез, синтез ДНК и белков, передача энергии и регуляция роста и развития растений [5, 6]. Эффективное использование фосфора в современной земледелии – ключевой фактор повышения продуктивности сельскохозяйственных культур, улучшения качества почвы и устойчивого функционирования агроценозов [7–9]. Однако, несмотря на возрастающее распространение технологии no-till в регионе, ее влияние на фосфатное состояние черноземов остается недостаточно изученным.

Цель исследования – оценка влияния технологии no-till на фосфатное состояние черноземов обыкновенных.

Материалы и методы

Исследования проведены на производственных посевах озимой пшеницы (*Triticum aestivum*) ЗАО им. Кирова (Песчанокопский район Ростовской области). Преобладающие почвы на территории хозяйства – черноземы обыкновенные карбонатные (предкавказские) различной мощности и степени эродированности. Объект исследования – чернозем обыкновенный карбонатный мощный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке со следующими физико-химическими показателями: содержание гумуса – 4,0–4,7 %; CaCO₃ с поверхности – 1,8, в горизонте Bca – 12,1–12,3; количество физической глины – 55,8, ила – 32,0 %; pH в верхней части профиля – около 7,9–8,0, в нижней – 8,2–8,3 [10].

Технология no-till в этом хозяйстве применяется с 2008 г. Всего было заложено 12 разрезов: 6 – при использовании no-till; 3 – при применении традиционной технологии, основанной на отвальной вспашке; 3 – на целинных участках. Отбор образцов проводили по ГОСТ Р 58595–2019 [11].

Валовой фосфор определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (спектрскан МАКС-GV) [12], фракционный состав минеральных фосфатов – по методу Гинзбург – Лебедевой [13].

Экспериментальные данные обрабатывали корреляционным и дисперсионным методами в пакете программ STATISTICA 13.3 с 5%-м уровнем значимости (P<0,05).

Результаты и обсуждение

Валовое содержание фосфора характеризует фосфатную емкость почв и является одним из важнейших показателей их потенциального плодородия. Как показали исследования, содержание валового фосфора в черноземе обыкновенном достаточно высокое (рис. 1).

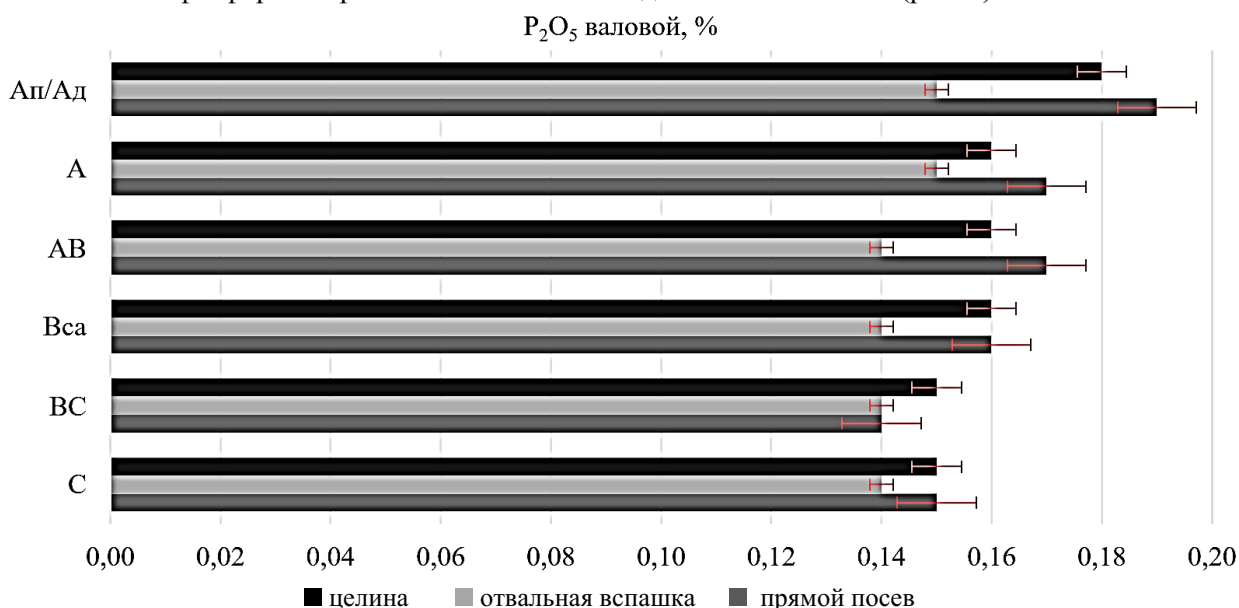


Рис. 1. Профильное распределение валового фосфора в черноземе обыкновенном, %
 / Fig. 1. Profile distribution of total phosphorus in calcic chernozem, %

Внутрипрофильное распределение запасов этого элемента равномерное с постепенным снижением вниз, что характерно для исследуемого региона [14]. Наибольшее содержание валовых фосфатов на всех исследуемых участках отмечено в верхнем горизонте почвы, что обусловлено биогенной аккумуляцией в связи с концентрацией здесь растительных остатков. Кроме того, на производственных посевах озимой пшеницы по обеим технологиям использовали фосфорсодержащие минеральные удобрения. Известно, что основная масса фосфора при внесении удобрений остается в верхнем слое почвы и редко мигрирует по профилю [10].

Максимальное содержание валового фосфора выявлено в почве с использованием технологии no-till (0,19 %), минимальное – при традиционной (0,15 %), что свидетельствует о снижении потенциальных запасов фосфора при интенсификации основной обработки. Полученные результаты согласуются с проведенными ранее исследованиями [15]. Существенное увеличение валового фосфора в гумусо-аккумулятивном горизонте чернозема обыкновенного в системе no-till, вероятно, связано с повышением органических форм этого элемента. В [16] установлено более высокое содержание гумуса в почвах полей прямого посева, чем на пахотных полях.

Выделение из почвы отдельных минеральных форм фосфора, различающихся по химическому составу, растворимости и доступности растениям, позволяет получить представление о соотношении лабильных и труднодоступных форм фосфора в почве и предвидеть их превращения [17].

Согласно полученным данным, на долю минеральных фосфатов в верхнем горизонте чернозема обыкновенного приходилось на целине 37 %, 43 % – при нулевой обработке, при отвальной вспашке – 53 % от валового фосфора. Основная доля минеральных фосфатов по профилю чернозема обыкновенного представлена высокоосновными фосфатами кальция Ca-PIII (36–62 %), что определяется генетическими особенностями почвы (рис. 2).

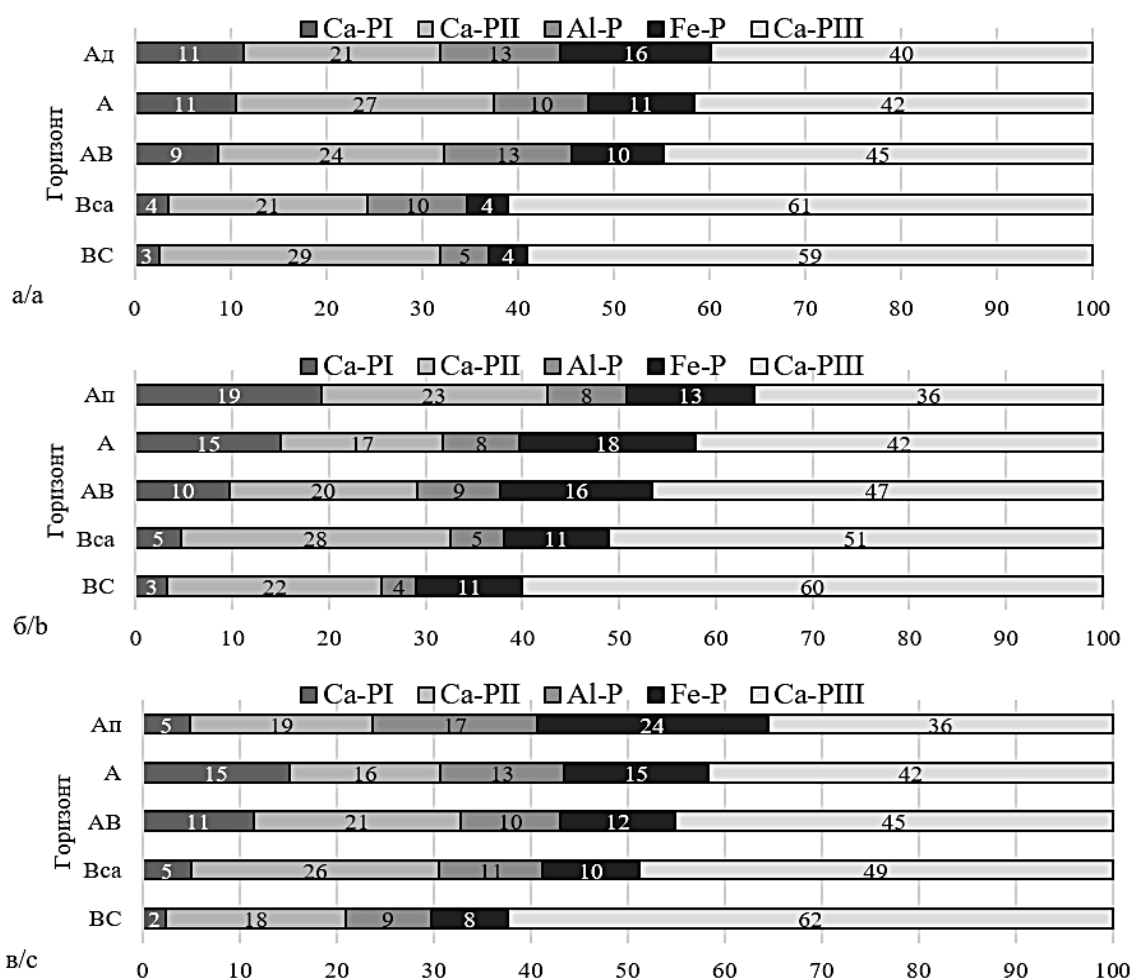


Рис. 2. Доля фракций минеральных фосфатов от их суммы в почве при использовании различных агротехнологий, % (а – целина; б – вспашка; в – нулевая) / Fig. 2. Proportion of mineral phosphorus fractions relative to their total content under different agricultural technologies, % (a - virgin land; b - moldboard plowing; c - no-till)

Повышенное содержание карбонатов в черноземах способствует снижению подвижности фосфора за счет образования труднодоступных для растений фосфатов кальция – $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. К тому же фосфаты кальция наиболее устойчивы в условиях щелочной или близкой к нейтральной реакции среды [18]. Количество разноосновных фосфатов кальция (Са-РІІ), которые являются ближним резервом для питания растений, колебалось от 96 до 183 мг/кг, что составляет 16–28 % от общего содержания минеральных фосфатов. Фосфатов кальция 1-й группы (Са-РІ), самых доступных для растений, значительно меньше – 15–149 мг/кг. Они занимали всего 2–19 % от суммы минеральных фосфатов. Низкая доступность фосфора растениям обусловлена слабой растворимостью его соединений в воде и сильной адсорбцией почвенными компонентами. Поэтому даже при высоком валовом содержании фосфора в почве растения испытывают его недостаток [19].

Фосфаты полуторных оксидов составляют в исследуемых черноземах незначительную долю. В свою очередь, среди них преобладает фракция Fe-Р. Максимальное количество этих фосфатов выявлено в гумусовых горизонтах.

Характер распределения каждой фракции по профилю имел свои особенности. Содержание Са-РІ и Fe-Р вниз по горизонтам почвы снижалось, количество Са-РІІІ увеличивалось. Содержание Са-РІІ и Al-Р изменялось с глубиной незначительно и находилось примерно на одном уровне.

Используемые агротехнологии оказывают существенное влияние на процессы трансформации труднодоступных форм фосфатов в легкодоступные для растений (рис. 2). В сравнении с целиной в верхнем горизонте чернозема обыкновенного установлено существенное увеличение суммы минеральных фосфатов по обеим технологиям. В пахотной почве указанное изменение обусловлено значительным повышением фракций Са-РІ и Са-РІІ, что связано, по-видимому, с усилением микробиологических процессов в этой части профиля и, как следствие, увеличением мобильности минеральных фосфатов.

Подвижность фосфатов кальция можно оценить по отношению Са-РІ+Са-РІІ/Са-РІІІ [14]. Самый высокий показатель подвижности фосфатов кальция – 1,2 в верхнем горизонте пахотного чернозема, для целинной почвы – 0,8, на производственных посевах с технологией no-till – 0,7. По сравнению с целинным и пахотным черноземом при использовании технологии no-till установлено достоверное повышение фракций Al-Р и Fe-Р, куда частично входят органофосфаты. По данным [3, 10, 16], нулевая обработка улучшает водно-физические свойства почв, усиливает биологическую активность и стабилизирует их гумусное состояние. При этом, соответственно, изменяет и интенсивность процессов трансформации как минеральных, так и органических фосфатов в почве.

Заключение

Проведенные исследования показали, что технологии возделывания сельскохозяйственных культур существенно влияют не только на валовое содержание, но и на фракционный состав минеральных фосфатов, определяя направление процессов их трансформации и потенциальную обеспеченность растений фосфором. Использование технологии no-till способствует накоплению валовых фосфатов в верхнем горизонте чернозема обыкновенного до 0,19 % против 0,15 % – при традиционной технологии, основанной на отвальной вспашке. В сравнении с целиной установлено увеличение суммы минеральных фосфатов по обеим технологиям. Однако в пахотном черноземе повышаются фракции Са-РІ и Са-РІІ, а при нулевой технологии – Al-Р и Fe-Р.

Список источников

1. Kirillova O., Sadreeva A., Markova S., Mukhametshina F. Current trends in the development of the Russian agrarian economy in ensuring food security // BIO Web of Conferences. 2020. Vol. 27. Art. 00035. EDN: RJQJJM. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700035>
2. Клименко А.И., Гринько А.В., Грабовец А.И. [и др.]. Зональные системы земледелия Ростовской области на 2022–2026 годы. Ростов н/Д.: Фед. Ростовский агр. науч. центр, 2022. 736 с. EDN: GHQGWS.
3. Дридигер В.К., Иванов А.Л., Кулинцев В.В. [и др.]. Чернозем обыкновенный. Прямой посев, Ставропольский край. Опыт, две ротации. Ставрополь: Сервисшкола, 2024. 355 с.
4. Дей С. Опыт Канады // Ресурсосберегающее земледелие. 2012. № 2 (14). С. 7–12.
5. Битюцкий Н.П. Минеральное питание растений: учебник. 2-е изд. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2020. 540 с.

6. Odoom A., Ofosu W. Role of Phosphorus in the Photosynthetic Dark Phase Biochemical Pathways // *Phosphorus in Soils and Plants*. 2024. <https://doi.org/10.5772/intechopen.112573>
7. Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М., Карпова Д.В., Андрианов С.Н., Бражникова Н.В., Карпукхин А.И., Кирпичников Н.А., Конончук В.Д., Самойлов М.Н. *Агробиогеохимический цикл фосфора*. М.: Россельхозакадемия, 2012. 512 с. EDN: RXZHUR.
8. Кудеяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // *Почвоведение*. 2019. № 1. С. 109–121. EDN: YVZMOL. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1901009X>
9. Singh G., Kaur G., Williard K., Schoonover J., Nelson K.A. Managing Phosphorus Loss from Agroecosystems of the Midwestern United States: A Review // *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 4. Art. 561. EDN: LBINNM. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040561>
10. Ильченко Я.И., Бирюкова О.А. Влияние минеральных удобрений на плодородие чернозема обыкновенного при возделывании озимой пшеницы по технологии No-till. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2023. 120 с. EDN: PXUDYZ. <https://doi.org/10.18522/801304548>
11. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб. М.: Стандартиформ, 2019. 8 с.
12. Ширкин Л.А. Рентгенофлуоресцентный анализ объектов окружающей среды: учеб. пособие. Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2009. 65 с. EDN: QJVAJ.
13. Гинзбург К.Е. Методы определения фосфора в почве // *Агрохимические методы исследования почв*. М.: Наука, 1975. С. 106–187.
14. Кучменко Е.В., Бирюкова О.А., Каменев Р.А., Медведева А.М. Фракционный состав минеральных фосфатов в черноземе обыкновенном при различных способах основной обработки // *Живые и биокосные системы*. 2021. № 36. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-36/article-3/> (дата обращения: 11.03.2025). EDN: FCPURT. <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2021-36-3>
15. Медведева А.М., Бирюкова О.А., Минкина Т.М., Кучменко Е.В., Манджиева С.С. Подвижность и распределение фосфора в черноземе обыкновенном при различных агротехнологиях // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2021. № 4. С. 95–102. EDN: HJGICM. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-4-95-102>
16. Мокриков Г.В., Минникова Т.В., Мясникова М.А. Изменение содержания и состава органического вещества черноземов Приазовья при использовании технологии прямого посева // *Агрохимия*. 2020. № 1. С. 18–24. EDN: VDYGCX. <https://doi.org/10.31857/S0002188120010093>
17. Васбиева М.Т. Изменение фракционного состава минеральных фосфатов, содержания подвижного фосфора и степени подвижности фосфатов по профилю дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // *Агрохимия*. 2021. № 7. С. 3–12. EDN: HOXKFV: <https://doi.org/10.31857/S0002188121070115>
18. Шеуджен А.Х. *Агробиогеохимия чернозема*. Майкоп: Полиграф-ЮГ, 2018. 308 с.
19. Сычев В.Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. М.: РАН, 2019. 328 с. EDN: ETPUNH.

References

1. Kirillova O., Sadreeva A., Markova S., Mukhametshina F. Current trends in the development of the Russian agrarian economy in ensuring food security. *BIO Web of Conferences*. 2020;27:00035. EDN: RJQJMM. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700035>
2. Klimenko A.I., Grinko A.V., Grabovets A.I. et al. *Zonal farming systems of the Rostov Region for 2022-2026*. Rostov-on-Don: Federal Rostov Agrarian Research Center Press; 2022. 736 p. (In Russ.). EDN: GHQGWS.
3. Dridiger V.K., Ivanov A.L., Kulintsev V.V. et al. *Common Chernozem. Direct sowing, Stavropol Territory. Experience, two rotations*. Stavropol: Service School; 2024. 355 p. (In Russ.).
4. Day S. Canada's Experience. *Resource-Saving Agriculture*. 2012;(2):7-12. (In Russ.).
5. Bityutsky N.P. *Mineral nutrition of plants*. Textbook. 2nd ed. St. Petersburg: St. Petersburg University Press; 2020. 540 p. (In Russ.).
6. Odoom A., Ofosu W. Role of Phosphorus in the Photosynthetic Dark Phase Biochemical Pathways. *Phosphorus in soils and plants*. 2024. <https://doi.org/10.5772/intechopen.112573>
7. Ivanov A.L., Sychev V.G., Derzhavin L.M., Karpova D.V., Andrianov S.N., Brazhnikova N.V., Karpukhin A.I., Kirpichnikov N.A., Kononchuk V.D., Samoilov M.N. *Agrobiogeochemical cycle of phosphorus*. Moscow: Russian Agricultural Academy Press; 2012. 512 p. (In Russ.). EDN: RXZHUR.
8. Kudeyarov V.N. Soil and biogeochemical aspects of the state of agriculture in the Russian Federation. *Soil Science*. 2019;(1):109-121. (In Russ.). EDN: YVZMOL. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1901009X>
9. Singh G., Kaur G., Williard K., Schoonover J., Nelson K.A. Managing Phosphorus Loss from Agroecosystems of the Midwestern United States: A Review. *Agronomy*. 2020;10(4):561. EDN: LBINNM. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040561>

10. Ilchenko Ya.I., Biryukova O.A. *Influence of mineral fertilizers on the fertility of common chernozem when cultivating winter wheat using the No-till technology*. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Publishing House; 2023. 120 p. (In Russ.). EDN: PXUDYZ. <https://doi.org/10.18522/801304548>
11. *Soils. Sampling. GOST R 58595-2019*. Moscow: Standartinform; 2019. 8 p. (In Russ.).
12. Shirkin L.A. *X-ray fluorescence analysis of environmental objects: a textbook*. Vladimir: Vladimir State University Publishing House; 2009. 65 p. (In Russ.). EDN: QJJVAJ.
13. Ginzburg K.E. *Methods for determining phosphorus in soil. Agrochemical methods of soil research*. Moscow: Science; 1975:106-187. (In Russ.).
14. Kuchmenko E.V., Biryukova O.A., Kamenev R.A., Medvedeva A.M. Fractional composition of mineral phosphates in Ordinary Chernozem under different methods of primary cultivation. *Living and Biocosmic Systems*. 2021;(36). (In Russ.). Available from: <https://jbks.ru/archive/issue-36/article-3/> [Accessed 11th March 2025]. EDN: FCPUPT. <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2021-36-3>
15. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Minkina T.M., Kuchmenko E.V., Mandzhieva S.S. Mobility and distribution of phosphorus in ordinary chernozem under various agrotechnologies. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):95-102. (In Russ.). EDN: HJGICM. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-4-95-102>
16. Mokrikov G.V., Minnikova T.V., Myasnikova M.A. Change in the content and composition of organic matter in the chernozems of the Azov region when using direct sowing technology. *Agrochemistry*. 2020;(1):18-24. (In Russ.). EDN: VDYGCX. <https://doi.org/10.31857/S0002188120010093>
17. Vasbieva M.T. Change in the fractional composition of mineral phosphates, the content of mobile phosphorus, and the degree of phosphate mobility in the profile of sod-podzolic soil during long-term application of fertilizers. *Agrochemistry*. 2021;(7):3-12. (In Russ.). EDN: HOXKFV. <https://doi.org/10.31857/S0002188121070115>
18. Sheudzhen A.Kh. *Agrobiogeochemistry of Chernozem*. Maikop: Polygraph-South; 2018. 308 p. (In Russ.).
19. Sychev V.G. *The current state of soil fertility and the main aspects of its regulation*. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2019. 328 p. (In Russ.). EDN: ETPUNH.

Информация об авторах

О.А. Бирюкова – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Я.И. Ильченко – младший научный сотрудник лаборатории агробиотехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

В.А. Ерин – младший научный сотрудник лаборатории агробиотехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Information about the authors

O.A. Biryukova – Doctor of Science (Agricultural), Professor of the Department of Soil Science and Land Resource Assessment, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Ya.I. Ilchenko – Junior Researcher of the Laboratory of Agrobiotechnology for Improving Soil Fertility and Agricultural Product Quality, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

V.A. Erin – Junior Researcher of the Laboratory of Agrobiotechnology for Improving Soil Fertility and Agricultural Product Quality, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Статья поступила в редакцию 13.08.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 13.08.2025; approved after reviewing 09.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 579.64

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-132-149>

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ РАСТЕНИЯМИ РИЗОСФЕРНОЙ МИКРОБИОТЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В СИСТЕМЕ РАСТЕНИЕ – МИКРООРГАНИЗМ

М.С. Мазанко¹, Е.В. Празднова², Ф.Ф. Амирджанов³, А.Б. Брень^{4✉}, С.А. Емельянцеv⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

⁴ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ Mary.bio@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0737-2929>

² prazdnova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7823-9044>

³ amirdzhanov@sfedu.ru

⁴ brenanzhelika@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-7452-6203>

⁵ emelyancev@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8031-2650>

Аннотация. Представлен систематический обзор современных научных данных о механизмах формирования и контроля растениями микробиоты ризосферы. Проанализированы основные пути влияния растений на состав и функциональную активность прикорневых микробных сообществ. Рассмотрена структурная организация ризосферы с выделением трех основных зон: эндоризосферы, ризопланы и экторизосферы, каждая из которых характеризуется специфичным составом микроорганизмов. Охарактеризованы механизмы привлечения полезных микроорганизмов через выработку корневых экссудатов, включающих аминокислоты, сахара, органические кислоты, витамины и фенольные соединения. Показано, что растения способны выборочно привлекать определенные таксоны бактерий посредством видоспецифичных химических сигналов и хемотаксиса. Рассмотрены процессы прикрепления бактерий к поверхности корня с участием адгезинов, белковых придатков и экзополисахаридов, приводящие к формированию биопленок. Проанализирована роль фитогормонов в регуляции состава микробиоты, включая стриголактоны, абсцизовую, индолуксусную, жасмоновую и салициловую кислоты. Представлены данные о генетической детерминированности взаимодействия растения – микроорганизм и различиях между дикими и культурными формами растений в формировании ризобиома. Обобщены современные представления о ризосфере как динамической системе со множественными обратными связями между растением и микробиотой. Сформулированы практические рекомендации для селекции бактерий-фитостимуляторов в сельскохозяйственных целях на основе понимания принципов растительно-микробных взаимодействий.

Ключевые слова: ризосфера, микробиота, корневые экссудаты, хемотаксис, фитогормоны, растительно-микробные взаимодействия, фитостимуляторы, биопленки, ризобиом, симбиоз

Для цитирования: Мазанко М.С., Празднова Е.В., Амирджанов Ф.Ф., Брень А.Б., Емельянцеv С.А. Механизмы формирования и контроля растениями ризосферной микробиоты: современные представления о взаимодействии в системе растение – микроорганизм // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 132–149. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-132-149>

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2023-0008.

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

Original article

MECHANISMS OF FORMATION AND CONTROL OF THE RHIZOSPHERE MICROBIOTA BY PLANTS: CURRENT UNDERSTANDING OF PLANT-MICROORGANISM INTERACTIONS

M.S. Mazanko¹, E.V. Prazdnova², F.F. Amirdzhanov³, A.B. Bren^{4✉}, S.A. Emelyantsev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

⁴ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ Mary.bio@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0737-2929>

² prazdnova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7823-9044>

³ amirdzhanov@sfedu.ru

⁴ brenanzhelika@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7452-6203>

⁵ emelyantsev@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8031-2650>

Abstract. This work is a systematic review of current scientific concepts regarding the mechanisms of formation and control of the rhizosphere microbiota by plants. The main pathways of plant influence on the composition and functional activity of root-associated microbial communities are analyzed. The structural organization of the rhizosphere is considered, with three main zones distinguished: the endorhizosphere, rhizoplane, and ectorhizosphere, each characterized by a specific composition of microorganisms. The mechanisms for attracting beneficial microorganisms through the production of root exudates, including amino acids, sugars, organic acids, vitamins, and phenolic compounds, are described. It is shown that plants can selectively attract specific bacterial taxa through species-specific chemical signals and chemotaxis. The processes of bacterial attachment to the root surface involving adhesins, protein appendages, and exopolysaccharides, leading to the formation of biofilms, are examined. The role of phytohormones in regulating the microbiota composition, including strigolactones, abscisic, indoleacetic, jasmonic, and salicylic acids, is analyzed. Data on the genetic determinism of plant-microorganism interactions and the differences between wild and cultivated plant forms in the formation of the rhizobiome are presented. Current views of the rhizosphere as a dynamic system with multiple feedback loops between the plant and the microbiota are summarized. Practical recommendations for the selection of phytostimulant bacteria for agricultural purposes, based on an understanding of the principles of plant-microbial interactions, are formulated.

Keywords: rhizosphere, microbiota, root exudates, chemotaxis, phytohormones, plant-microbial interactions, phytostimulants, biofilms, rhizobiome, symbiosis

For citation: Mazanko M.S., Prazdnova E.V., Amirdzhanov F.F., Bren A.B., Emelyantsev S.A. Mechanisms of Formation and Control of the Rhizosphere Microbiota by Plants: Current Understanding of Plant-Microorganism Interactions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):132-149. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-132-149>

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment in the field of scientific activity No. FENW-2023-0008.

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

Введение

В настоящее время не вызывает сомнений тот факт, что микробиота корней играет ключевую роль в поддержании здоровья растений и существенно влияет на их рост, продуктивность и устойчивость к заболеваниям [1, 2]. Множество работ посвящено влиянию бактерий-фитостимуляторов на растения (повышение устойчивости растений к различным стрессам, улучшение усвоения питательных веществ, стимуляция роста и стабилизация иммунитета) [1–4]. Основные механизмы фитостимуляции растений бактериями [4, 5]:

- фиксация атмосферного азота;
- синтез фитогормонов (ауксины, цитокинины, гиббереллины);
- растворение неорганических фосфатов;
- выработка веществ, подавляющих развитие фитопатогенов;
- модуляция защитных ответов растений.

Рассматривая взаимодействия в ризосфере, стоит учитывать, что и растения выработали механизмы для формирования подходящих им микробных сообществ, чтобы использовать их огромный генетический ресурс для расширения собственных адаптивных возможностей [6–8]. Однако систематических обзоров, посвященных влиянию самих растений на состав и функции микробиоты ризосферы, значительно меньше. При этом накапливаются данные, свидетельствующие, что растения и их ризосферный микробиом – это единая адаптивная система, функционирующая в совокупности сигналов, обмена веществ и экологической кооперации. Актуальность данного направления подтверждается не только нехваткой системных обзоров и быстрым приростом новых данных. Мы полагаем, что глубокое понимание механизмов языка коммуникации между растением и его микробиомом позволит в перспективе создавать новые технологии для поддержания здоровья почвы и повышения урожайности без применения химических стимуляторов и пестицидов.

Задача данной работы – объединение имеющихся разрозненных данных о способах формирования и контроля растениями прикорневой микробиоты и характеристика основных принципов этого динамического процесса.

Понятие и структура ризосферы

Ризосфера – зона почвы вокруг корней, формирующая экологическую нишу для микробиоты и её взаимодействия с растением-хозяином [9]. Она представляет собой сложную экосистему из бактерий, некоторые из которых являются фитостимуляторами (PGPB), грибов, водорослей, простейших, нематод и членистоногих [10]. Численность культивируемых бактерий достигает 10^9 КОЕ/г, что в 10–1000 раз превышает уровень в окружающей почве, тогда как видовое разнообразие ниже [2, 11]. Ризосферные сообщества таксономически отличаются от почвенных и формируются уже через неделю после появления корней [12–15].

Зонирование микробных сообществ в ризосфере. В ризосфере можно выделить три отдельные зоны [16]:

- 1) эндоризосфера – внутренние ткани корня, заселённые непатогенными эндифитами;
- 2) ризоплана – поверхность корня с бактериальными биоплёнками;
- 3) экторизосфера – почва в пределах диффузии корневых экссудатов.

По мере удаления от корня наблюдаются горизонтальные и радиальные градиенты: копиотрофы (например, *Pseudomonadota*, *Bacteroidota*) обогащаются у корня, олиготрофы (например, *Acidobacteriota*) сокращаются. Микробное разнообразие также снижается по мере движения от внешнего контура ризосферы к корню [17, 18] (табл. 1).

Роль растений в формировании зональности. Вышеописанная зональность формируется за счёт градиентов pH и биоактивных веществ растений. Так, известно, что корни овсяга (*Avena fatua*) вызывают сукцессионные изменения, сокращая разнообразие ризосферных бактерий через снижение *Acidobacteria*, *Actinobacteria* и *Firmicutes*, селективно стимулируя *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria* и *Bacteroidetes* [19].

Специфичность ризобиома зависит от происхождения растения (дикое/культурное), видовой принадлежности, почвенных условий и генетических особенностей. У томатов (*Solanum lycopersicum*) дикие формы обогащают ризосферу родами *Acidovorax*, *Massilia* и *Rhizobium*, тогда как современные сорта – видами *Pseudomonas* [20]. Аналогично дикая солодка (*Glycyrrhiza uralensis*) демонстрирует большее микробное разнообразие, чем культурная [21]. Даже растения одного семейства *Zygophyllaceae* имеют различные индексы альфа-разнообразия в ризосфере [22].

Генотипические различия внутри видов определяют специфичные ризосферные микробиомы [23]. У сои (*Glycine max*) независимо от почвы обнаруживаются характерные роды: *Rhizobium*, *Novosphingobium*, *Phenylobacterium*, *Streptomyces*, *Nocardioides*, *Flavisolibacter* и *Caulobacter* [7, 24]. Обратный процесс показан у томатов – несмотря на различия почв, сукцессия ризобиома протекает сходно, с обогащением видами *Rhizobium*, *Flavobacterium* и *Beijerinckia fluminensis* [25].

Таблица 1 / Table 1

**Типичное распределение групп микроорганизмов по зонам ризосферы
/ Typical distribution of microorganism groups across the rhizosphere zones**

Зона	Доминирующие таксоны и особенности	Функциональный профиль
Вмещающая почва	<i>Acidobacteria</i> , <i>Chloroflexi</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Nitrospirae</i>	Олиготрофия, сложная деградация углерода, спорообразование
Экторизосфера	<i>Proteobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i> ↑ <i>Acidobacteria</i> ↓	Обогащение генов, отвечающих за преобразование органических соединений, фиксацию азота и денитрификацию
Ризоплана	Копиотрофы (быстрорастущие): <i>Proteobacteria</i> , <i>Firmicutes</i> ↑	Функции быстрого цикла, подвижность, взаимодействие растений и микроорганизмов
Эндоризосфера	<i>Actinophytocola</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Pseudonocardia Rhizobium</i>	Симбиоз, стимуляция роста растений, биоактивные метаболиты

Генетическая природа влияния растений подтверждена локусами, контролирующими микробиоту: у ячменя (*Hordeum vulgare*) – QRMC-3HS с генами NLR и XTH [26]; у томатов – QTL одомашнивания, включая FIT и SITIP2 [27]. У риса (*Oryza sativa*) выявлена регуляторная сеть PNR-факторов, связывающая 266 транскрипционных факторов с 47 генами микоризного симбиоза [28].

Механизмы формирования ризобиома растениями

Выработка корневого экссудата и хемотаксис. Растения выделяют до 20 % продуктов фотосинтеза в ризосферу, формируя экссудаты – смесь низко- и высокомолекулярных органических соединений, служащих источником питания и сигналами для микробов [29–33]. В экссудатах присутствуют аминокислоты, сахара, витамины и регуляторы роста (биотин, стриголактоны, тиамин и др.), жирные и органические кислоты, фенольные соединения – хемотактанты [31–33].

Состав экссудатов зависит от вида и генотипа растения, стадии развития, условий среды и уже связанного микробиома; изменения регулируются в том числе через механизм SIREM (передача сигналов от корня к корню, называемая системно индуцированной корневой экссудацией метаболитов) [31, 34–37].

Градиенты этих веществ различаются по зонам корня, направляя селективную колонизацию [38–41].

Некоторые экссудаты (флавоноиды, цитрат, малат, оксалатные кумарины, яблочная кислота, камалексин, бензоксаиноиды или даже этилен) могут быть специфическими рекрутерами конкретных таксонов [42]. Фенольные соединения имеют особое значение, поскольку они способны влиять на скорость роста большинства бактерий. С другой стороны, кофейная кислота и фенольные соединения могут обеспечивать защиту растений от патогенов [43]. Кроме того, обнаружено, что обилие нескольких специфических соединений, включая некоторые сахара и аминокислоты, коррелирует с обилием микроорганизмов, таких как *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Clostridiales* [17, 44].

Существует гипотеза «крика о помощи», согласно которой атака патогенов запускает перераспределение экссудатов, привлекая конкретные защитные бактерии. Это подтверждается увеличением бактерий-антагонистов в почве после вспышки заболеваний, например ростом антимикробных штаммов *B. subtilis* после заражения листьев *Arabidopsis thaliana* патогеном *Pseudomonas syringae* [45–49].

При определенных условиях экологического стресса, в частности при недостатке фосфора или железа, у некоторых растений усиливается секреция цитрата, малата и оксалата для обогащения ризосферы органическим углеродом, что привлекает фитостимулирующих бактерий [50]. Так, цитрусовые растения привлекают бактерий (*Bacillus*, *Streptomyces*, *Pseudomonas*, *Mesorhizobium*, *Sphingomonas* и *Rhizobium*), способных переводить в растворимую форму фосфор, серу и кальций, синтезировать регуляторы роста и сидерофоры [23]. Бобовые растения выделяют флавоноиды и изофлавоноиды, которые повышают экспрессию генов образования клубеньков (nod) у азотфиксирующих симбиотических бактерий [51].

Показано, что градиенты экссудатов запускают хемотаксис: подвижные фитостимуляторы (*Azotobacter spp.*, *Azospirillum brasilense*, *Bacillus pumilus* и *Corynebacterium flavesces*) ориентируются на сахара и флавоноиды, что делает хемотаксис и подвижность ключевыми факторами структурирования ризосферного микробиома [52–54].

Видо- и штаммоспецифичность при формировании ризосферы. Описанная выше видоспецифичность в привлечении растениями бактериальных штаммов зависит от спектра выделяемых соединений.

Так, из 9 штаммов *Azotobacter spp.* два предпочитали экссудаты пшеницы, а семь – хлопка [55]. Хемотаксис к экссудатам риса сильнее у рисовых эндофитов (*C. flavesces*, *B. pumilus*), чем у изолятов из кукурузы [53]. Аналогично экссудаты кукурузы привлекают штаммы из корней кукурузы, но не риса [55].

Штаммоспецифичность хорошо документирована у *Azospirillum*: некоторые штаммы *A. brasilense* привлекаются бензоатом, тогда как *A. lipoferum* и другие штаммы *A. brasilense* не реагируют [56]. *A. brasilense* из пшеницы предпочитает d-фруктозу, l-аспартат, оксалат и цитрат, в то время как штаммы из кукурузы (*Zea mays*) и *A. lipoferum* из калларской травы (*Leptochloa fusca*) тяготеют к l-малату – ключевому метаболиту кислотоустойчивости [57, 58]. Поскольку хемотаксические различия связаны с экологическим происхождением больше, чем с таксономией, штаммы специфически адаптированы к метаболизму растения-хозяина (C₃ для пшеницы, C₄ для кукурузы и калларской травы) [58].

После формирования ризосферы взаимодействие растений с ризосферным микробиомом продолжается через изменения экссудации. Так, инокуляция *Azotobacter* в ризосферу индуцирует специфические сдвиги в составе сахаров, аминокислот и органических кислот экссудатов [54]. Бобовые усиливают секрецию флавоноидов после контакта с *A. brasilense* и *Chryseobacterium balustinum* [59, 60]. *Azospirillum* на кукурузе изменяет вторичные метаболиты корней и побегов штаммо- и сортоспецифично, что указывает на адаптацию всего растения [61].

Гормональная регуляция. Ещё одним способом контроля уже сформировавшейся микробиоты является выработка фитогормонов, присутствующих в корневых экссудатах и напрямую влияющих на микробиом корня [62–64].

Стриголактоны – недавно признанные фитогормоны, регулирующие архитектуру корней, ветвление побегов и коммуникацию с микроорганизмами. Они участвуют в симбиозе с клубеньковыми бактериями: дефицитные по ним мутанты показывают сниженное образование клубеньков, восстанавливаемое экзогенными стриголактонами. Также они усиливают роение и подвижность ризобий [65–68]. Однако сверхэкспрессия стриголактонов увеличивает и численность фитопатогенов (*Fusarium solani*, *Rhizobiaceae*) [63].

Абсцизовая кислота также влияет на образование клубеньков, вероятно, через подавление биосинтеза стриголактонов [69, 70]. Абсцизовая и индолуксусная кислоты служат источником углерода для ризобактерий (*Rhodococcus sp.*, *Novoshingobium sp.*, *P. putida*), обеспечивая селективный отбор микроорганизмов [71, 72]. Индолуксусная кислота дополнительно стимулирует антимикробную активность *Streptomycetaceae* [73].

Салициловая кислота активирует рецепторы NPR1, NPR3 и NPR4, регулирующие иммунитет растений; мутанты с дефицитом NPR1 имеют сниженное альфа-разнообразие эндосферы [74–76]. Жасмоновая кислота повышает альфа-разнообразие ризосферы, действуя косвенно через изменения экссудатов: её дефицит снижает выработку хемоаттрактантов и соединений межбактериального взаимодействия [44, 77]. Применение обеих кислот увеличивает содержание антимикробных глюкозинолатов и кемферола в экссудатах, одновременно усиливая секрецию веществ положительного хемотаксиса бактерий-фитостимуляторов [78].

Процесс формирования ризосферной микробиоты

После привлечения аттрактантами начинается прикрепление бактерий к корню. В этом процессе также немаловажную роль играют видоспецифические структуры, за счёт которых происходит выборочное прикрепление клеток бактерий и формирование ризосферной микробиоты. Для успешной колонизации клетки должны гидролизовать ткани растения, участвовать в кворум-сенсинге, формировать биоплёнки, обладать подвижностью и синтезировать антибиотики [79–81].

Первичное прикрепление – слабое и обратимое; оно обусловлено гидрофобными и электростатическими взаимодействиями, поэтому к корню фиксируется лишь 0,4–3,5 % инокулированных

клеток. Частично это связано с электростатическим отталкиванием между отрицательно заряженной оболочкой бактериальной клетки и поверхностью корня [82–84].

Более тесный, но ещё обратимый контакт обеспечивают адгезины: жгутики, пили, фимбри, поверхностные белки и экзо-/капсульные полисахариды [85–89]. Фимбри, богатые гидрофобными остатками, типичны для ризобактерий. У *A. brasilense* и *P. fluorescens* за адгезию и агрегацию отвечают наружные мембранные белки (МОМР). Они находятся на внешней стороне бактериальной клетки и взаимодействуют с поверхностными доменами белков и полисахаридов, расположенных на внешней стороне корня [85].

Вторая фаза прикрепления включает прочное необратимое связывание бактерий с поверхностью корня, опосредованное синтезом внеклеточных целлюлозных фибрилл и видоспецифичных вторичных факторов прикрепления, чувствительных к составу клеточной стенки растения [85, 90–93]. Видоспецифические факторы играют ключевую роль во вторичном прикреплении. Они включают внеклеточные белки и полисахариды, позволяющие бактериям накапливаться в месте первичного прикрепления [83]. Так, белок LapA у *Pseudomonas* определяет переход от обратимой полярной фиксации к прочной адгезии, а белок RapA1 у *Rhizobium* скрепляет клетки через связи экзополисахаридов [94, 95].

После закрепления микроколонии превращаются в зрелые биоплёнки – гетерогенные сообщества, погружённые в матрицу экзополисахаридов с водными каналами, которые обеспечивают диффузию питательных веществ, кислорода и способствуют горизонтальному переносу генов [88, 96–98]. Образование биопленок является ключевым фактором успешной колонизации [96].

Механизмы реагирования бактерий на сигналы растений

Для ряда веществ в экссудатах, хотя и не для всех, можно выделить конкретные рецепторы в бактериальных клетках, воспринимающие химические сигналы растений и запускающие механизмы таксиса [99–104] (табл. 2).

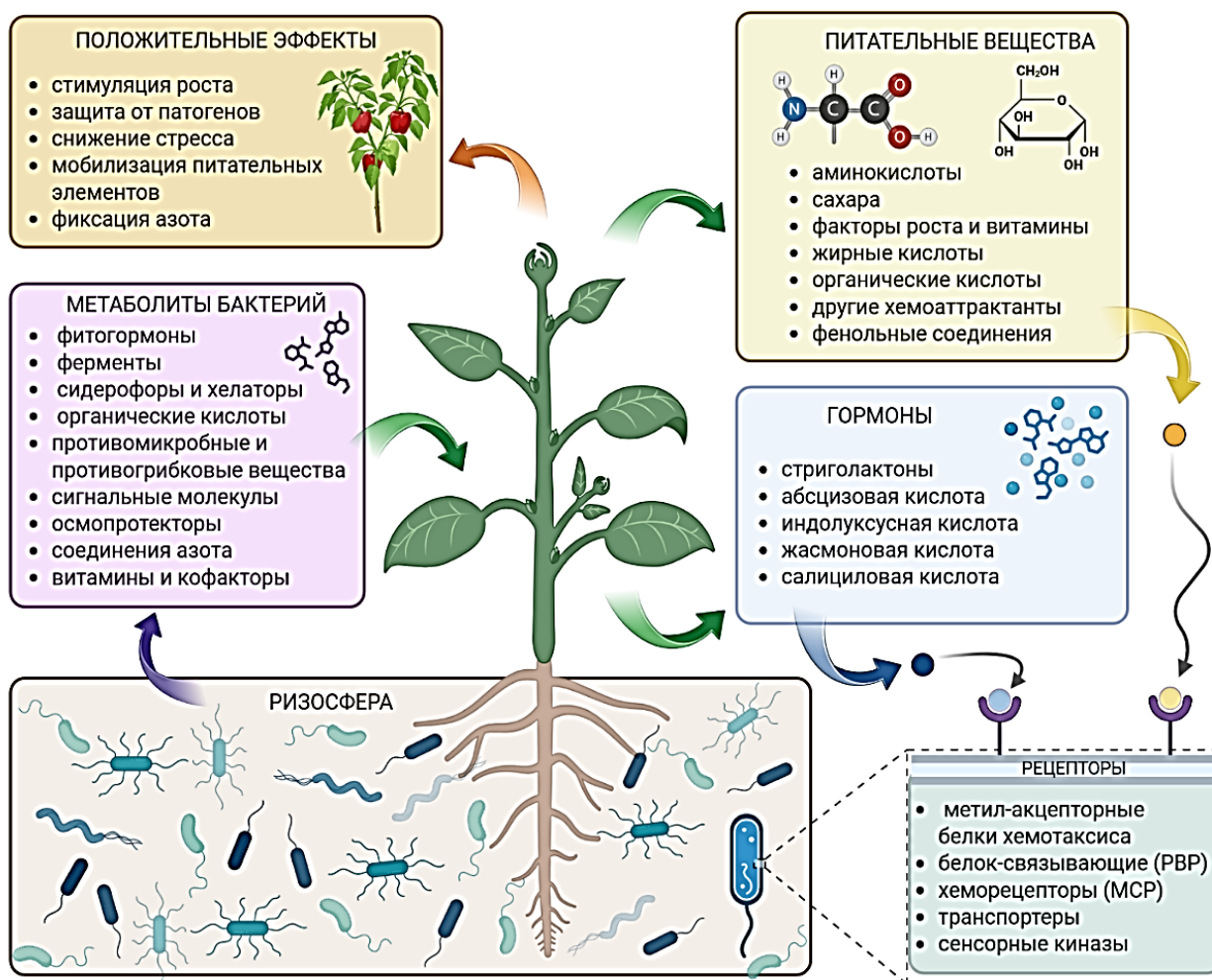
Таблица 2 / Table 2

Бактериальные рецепторы и классы экссудата / Bacterial receptors and classes of root exudates

Тип экссудата	Тип рецепторов/сенсоров	Бактерии
Аминокислоты	Метил-акцепторные белки хемотаксиса, домен dCache_1AA	<i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>E. coli</i>
Сахара	Периплазматические связывающие белки (PBP), специфические MCP	<i>E. coli</i> , <i>Bacillus subtilis</i>
Факторы роста и витамины	Различные транспортеры и сенсорные киназы	Многие почвенные/ризосферные бактерии
Жирные кислоты	FadR, FapR, FabR (транскрипционные регуляторы), сенсорные киназы	<i>E. coli</i> , <i>B. subtilis</i>
Органические кислоты	MCP, гистидинкиназы; различные транспортеры	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Acetobacter</i>
Другие хемоаттрактанты	Хеморецепторы (MCP, сенсорные киназы)	Широкий ряд таксонов
Фенольные соединения	MCP (например, McpA, McpC, HemAT в <i>B. subtilis</i>)	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas</i>
Индолуксусная кислота	MCP, сенсорные киназы; белки, связывающие ИУК	<i>Pseudomonas</i> , <i>Azospirillum</i>
Салициловая кислота	MCP в некоторых бактериях	<i>Pseudomonas</i>

Стоит отметить, что для ряда веществ из экссудатов растений еще не найдены соответствующие рецепторы, так что механизмы их участия в сигналинге представляют собой перспективную область исследований.

Все обсуждавшиеся выше механизмы обобщенно представлены на рисунке.



Интегральная схема взаимодействий в ризосфере / Integrated schematic of interactions in the rhizosphere

Можно сделать вывод, что ризосфера является сложной многоуровневой динамической системой, включающей в себя многочисленные обратные связи между растением и корневой микробиотой. Не вызывает сомнений, что подобные связи длительно развивались в ходе эволюции и потому закреплены в генотипах как растений-хозяев, так и бактерий-симбионтов.

Растение привлекает к себе необходимую микробиоту из ризосферы за счёт выделения разнообразных питательных и сигнальных корневых экссудатов, в свою очередь бактерии выработали механизмы хемотаксиса, позволяющие безошибочно находить растение-хозяина. После формирования микробиоты в ризосфере растение способно при необходимости влиять на её состав, изменяя структуру и привлекая новых членов сообщества.

Критерии отбора штаммов-фитостимуляторов

Как показано выше, взаимодействие растений с бактериями высокоспецифично и зависит как от вида, сорта и даже особенностей генотипа в пределах одного вида растения, так и от конкретного штамма микроорганизма. Из этого следует два важных практических вывода, которые необходимо учитывать при поиске новых бактерий-фитостимуляторов для нужд сельского хозяйства.

Во-первых, в связи с тем, что различные штаммы одного и того же вида бактерий могут иметь неодинаковое сродство к разным видам растений [54, 55, 58], при поиске новых бактерий-фитостимуляторов необходимо в качестве источника использовать тот же вид растений, что и целевое растение-хозяин. Штаммы-фитостимуляторы, адаптированные к другому виду, могут не отреагировать на сигналы целевого растения.

Во-вторых, поскольку ризобиом расположен либо на поверхности корня, либо на малом расстоянии от него, в качестве источника бактерий-фитостимуляторов, способных встроиться в микробиом корня и проявить там активность, при отборе образцов почвы для метагеномного и микробиологического анализа следует брать не почву, предварительно очищенную от корней, а, напротив, корни растений с налипшими на них почвенными частичками, ведь истинная корневая микробиота находится именно там.

Заключение

Растения активно формируют и регулируют сообщество корневой микробиоты, используя широкий спектр биохимических, молекулярных и физиологических инструментов для отбора, стимуляции и контроля микробных партнеров. Понимание этих процессов открывает новые возможности для устойчивого земледелия и управления микробиологическим здоровьем почв.

Список источников

1. Chiquito-Contreras C.J., Meza-Menchaca T., Guzmán-López O., Vásquez E.C., Ricaño-Rodríguez J. Molecular insights into plant-microbe interactions: A comprehensive review of key mechanisms // *Front. Biosci.-Elite*. 2024. Vol. 16, № 1. Art. 9. EDN: QJNJUF. <https://doi.org/10.31083/j.fbe1601009>
2. Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria // *Annu Rev. Microbiol.* 2009. Vol. 63, № 1. P. 541–556. EDN: NCADV. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>
3. Park I., Seo Y.S., Manna M. Recruitment of the rhizo-microbiome army: assembly determinants and engineering of the rhizosphere microbiome as a key to unlocking plant potential // *Front. Microbiol.* 2023. Vol. 14. Art. 1163832. EDN: QCXUVB. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1163832>
4. Compant S., Samad A., Faist H., Sessitsch A. A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application // *J. Adv. Res.* 2019. Vol. 19. P. 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
5. Luo C., He Y., Chen Y. Rhizosphere microbiome regulation: Unlocking the potential for plant growth // *Curr. Res. Microb. Sci.* 2024. Vol. 8. Art. 100322. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100322>
6. Reinhold-Hurek B., Bünger W., Burbano C.S., Sabale M., Hurek T. Roots shaping their microbiome: global hotspots for microbial activity // *Annu Rev. Phytopathol.* 2015. Vol. 53. P. 403–424. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102342>
7. Liu F., Hewezi T., Lebeis S.L., Pantalone V., Grewal P.S., Staton M.E. Soil indigenous microbiome and plant genotypes cooperatively modify soybean rhizosphere microbiome assembly // *BMC Microbiol.* 2019. Vol. 19, № 1. Art. 201. EDN: OQVFM. <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1572-x>
8. Brown S.P., Grillo M.A., Podowski J.C., Heath K.D. Soil origin and plant genotype structure distinct microbiome compartments in the model legume *Medicago truncatula* // *Microbiome*. 2020. Vol. 8, № 1. Art. 139. EDN: RWHOD. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00915-9>
9. Benaissa A., Djebbar R., Abderrahmani A. Antagonistic effect of plant growth promoting rhizobacteria associated with *Rhus tripartita* on gram positive and negative bacteria // *Analele Universității din Oradea, Seria Relații Internaționale și Studii Europene*. 2019. Vol. 26, № 2. P. 67–72. EDN: NSMYSH.
10. Glick B.R. *Beneficial Plant-Bacterial Interactions*. Cham: Springer, 2020.
11. Mhlongo M.I., Piater L.A., Madala N.E., Labuschagne N., Dubery I.A. The Chemistry of Plant-Microbe Interactions in the Rhizosphere and the Potential for Metabolomics to Reveal Signaling Related to Defense Priming and Induced Systemic Resistance // *Front. Plant Sci.* 2018. Vol. 9. Art. 112. EDN: YGNSST. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00112>
12. Peiffer J.A., Spor A., Koren O., Jin Z., Tringe S.G., Dangl J.L., Buckler E.S., Ley R.E. Diversity and heritability of the maize rhizosphere microbiome under field conditions // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2013. Vol. 110, № 16. P. 6548–6553. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302837110>
13. Bulgarelli D., Garrido-Oter R., Münch P. C., Weiman A., Dröge J., Pan Y., McHardy A. C., Schulze-Lefert P. Structure and Function of the Bacterial Root Microbiota in Wild and Domesticated Barley // *Cell Host Microbe*. 2015. Vol. 17, № 3. P. 392–403. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2015.01.011>
14. Cheng Z., Lei S., Li Y., Huang W., Ma R., Xiong J., Zhang T., Jin L., Haq H., Xu X., Tian B. Revealing the Variation and Stability of Bacterial Communities in Tomato Rhizosphere Microbiota // *Microorganisms*. 2020. Vol. 8, № 2. Art. 170. EDN: HBOYZS. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020170>
15. Tkacz A., Bestion E., Bo Z., Hortala M., Poole P. S. Influence of Plant Fraction, Soil, and Plant Species on Microbiota: a Multikingdom Comparison // *mBio*. 2020. Vol. 11, № 1. Art. e02785-19. EDN: VFUQZW. <https://doi.org/10.1128/mbio.02785-19>

16. Schröder P., Hartmann A. New developments in rhizosphere research // *J. Soils Sediments*. 2003. Vol. 3, № 4. P. 227–227. EDN: DXYEVV. <https://doi.org/10.1007/bf02988661>
17. Ling N., Wang T., Kuzuyakov Y. Rhizosphere bacteriome structure and functions // *Nat. Commun*. 2022. Vol. 13, № 1. Art. 836. EDN: BHMRFQ. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28448-9>
18. Fu X., Huang Y., Fu Q., Qiu Y., Zhao J., Li J., Wu X., Yang Y., Liu H., Yang X., Chen H. Critical transition of soil microbial diversity and composition triggered by plant rhizosphere effects // *Front. Plant Sci*. 2023. Vol. 14. Art. 1252821. EDN: QLXIYB. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1252821>
19. Shi S., Nuccio E., Herman D. J., Rijkers R., Estera K., Li J., Rocha U. N. d., He Z., Pett-Ridge J., Brodie E.L., Zhou J., Firestone M. Successional Trajectories of Rhizosphere Bacterial Communities over Consecutive Seasons // *mBio*. 2015. Vol. 6, № 4. Art. e00746. <https://doi.org/10.1128/mbio.00746-15>
20. Cordovez V., Rotoni C., Dini-Andreote F., Oyserman B., Carrión V.J., Raaijmakers J. M. Successive plant growth amplifies genotype-specific assembly of the tomato rhizosphere microbiome // *Sci. Total Environ*. 2021. Vol. 772. Art. 144825. EDN: PGJSOD. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144825>
21. Zhong C., Gao T., Bai N. Multi-omics profiling reveals comprehensive microbe-plant-metabolite regulation patterns for medicinal plant *Glycyrrhiza uralensis* Fisch // *Plant Biotechnol. J*. 2022. Vol. 20, № 10. P. 1874–1887. EDN: MAZLQY. <https://doi.org/10.1111/pbi.13868>
22. Xu D., Yu X., Yang J., Zhao X., Bao Y. High-Throughput Sequencing Reveals the Diversity and Community Structure in Rhizosphere Soils of Three Endangered Plants in Western Ordos, China // *Curr. Microbiol*. 2020. Vol. 77, № 10. P. 2713–2723. EDN: FDPUYQ. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02054-8>
23. Castellano-Hinojosa A., Albrecht U., Strauss S.L. Interactions between rootstocks and compost influence the active rhizosphere bacterial communities in citrus // *Microbiome*. 2023. Vol. 11, № 1. Art. 79. EDN: IGUFYS. <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01524-y>
24. Zhou Y., Ma J., Yang J., Lv Z., Song Z., Han H. Soybean rhizosphere microorganisms alleviate Mo nano-materials induced stress by improving soil microbial community structure // *Chemosphere*. 2023. Vol. 310. Art. 136784. EDN: IXCWML. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136784>
25. Su L., Wang G., Shu S., Wang D., Liu K., Zhang S. Composition, function and succession of bacterial communities in the tomato rhizosphere during continuous cropping // *Biol. Fertil. Soils*. 2023. Vol. 59, № 7. P. 723–732. EDN: YAJAGM. <https://doi.org/10.1007/s00374-023-01731-7>
26. Escudero-Martinez C., Coulter M., Alegria Terrazas R., Foito A., Kapadia R., Pietrangelo L., Maver M., Sharma R., Aprile A., Morris J., Hedley P.E., Maurer A., Pillen K., Naclerio G., Mimmo T., Barton G.J., Waugh R., Abbott J., Bulgarelli D. Identifying plant genes shaping microbiota composition in the barley rhizosphere // *Nat. Commun*. 2022. Vol. 13, № 1. Art. 3443. EDN: JCLKYF. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31022-y>
27. Oyserman B.O., Flores S.S., Griffioen T., Pan X., van der Wijk E., Pronk L., Lokhorst W., Nurfikari A., Paulson J. N., Movassagh M., Stopnisek N., Kupczok A., Cordovez V., Carrión V.J., Ligterink W., Snoek B.L., Medema M.H., Raaijmakers J.M. Disentangling the genetic basis of rhizosphere microbiome assembly in tomato // *Nat. Commun*. 2022. Vol. 13, № 1. Art. 3228. EDN: FIEMQC. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30849-9>
28. Shi J., Zhao B., Zheng S., Zhang X., Wang X., Dong W., Xie Q., Wang G., Xiao Y., Chen F., Yu N., Wang E. A phosphate starvation response-centered network regulates mycorrhizal symbiosis // *Cell*. 2021. Vol. 184, № 22. P. 5527–5540.e18. EDN: RICXUW. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.09.030>
29. Estabrook E.M., Yoder J.I. Plant-plant communications: rhizosphere signaling between parasitic angiosperms and their hosts // *Plant Physiol*. 1998. Vol. 116, № 1. P. 1–7.
30. Li M., Song Z., Li Z., Qiao R., Zhang P., Ding C., Xie J., Chen Y., Guo H. Populus root exudates are associated with rhizosphere microbial communities and symbiotic patterns // *Front. Microbiol*. 2022. Vol. 13. Art. 1042944. EDN: IRYRXL. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1042944>
31. Sasse J., Martinoia E., Northen T. Feed Your Friends: Do Plant Exudates Shape the Root Microbiome? // *Trends Plant Sci*. 2018. Vol. 23, № 1. P. 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.003>
32. Upadhyay S.K., Srivastava A.K., Rajput V.D., Chauhan P.K., Bhojiya A.A., Jain D., Chaubey G., Dwivedi P., Sharma B., Minkina T. Root exudates: mechanistic insight of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable crop production // *Front. Microbiol*. 2022. Vol. 13. Art. 916488. EDN: LKLFGY. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.916488>
33. Trovato M., Funck D., Forlani G., Okumoto S., Amir R. Editorial: amino acids in plants: regulation and functions in development and stress defense // *Front. Plant Sci*. 2021. Vol. 12. Art. 772810. EDN: TUSSLF. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.772810>
34. Feng H., Fu R., Hou X., Lv Y., Zhang N., Liu Y., Xu Z., Miao Y., Krell T., Shen Q., Zhang R. Chemotaxis of beneficial rhizobacteria to root exudates: The first step towards root-microbe rhizosphere interactions // *Int. J. Mol. Sci*. 2021. Vol. 22, № 13. Art. 6655. EDN: QYPJQZ. <https://doi.org/10.3390/ijms22136655>
35. Yang K., Fu R., Feng H., Jiang G., Finkel O., Sun T., Liu M., Huang B., Li S., Wang X., Yang T., Wang Y., Wang S., Xu Y., Shen Q., Friman V.-P., Jousset A., Wei Z. RIN enhances plant disease resistance via root exudate-mediated assembly of disease-suppressive rhizosphere microbiota // *Mol. Plant*. 2023. Vol. 16, № 9. P. 1379–1395. EDN: PNELEI. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.08.004>

36. Korenblum E., Dong Y., Szymanski J., Panda S., Jozwiak A., Massalha H., Meir S., Rogachev I., Aharoni A. Rhizosphere microbiome mediates systemic root metabolite exudation by root-to-root signaling // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2020. Vol. 117, № 7. P. 3874–3883. EDN: TQZVAE. <https://doi.org/10.1073/pnas.1912130117>
37. Chaparro J.M., Badri D.V., Vivanco J.M. Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development // ISME J. 2014. Vol. 8, № 4. P. 790–803. EDN: SSQFKR. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.196>
38. Haichar F. e. Z., Marol C., Berge O., Rangel-Castro J.I., Prosser J.I., Balesdent J., Heulin T., Achouak W. Plant host habitat and root exudates shape soil bacterial community structure // ISME J. 2008. Vol. 2, № 12. P. 1221–1230.
39. Dennis P.G., Miller A.J., Hirsch P.R. Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? // FEMS Microbiol. Ecol. 2010. Vol. 72, № 3. P. 313–327. EDN: MYPOEP. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x>
40. Zhao M., Zhao J., Yuan J., Hale L., Wen T., Huang Q., Vivanco J.M., Zhou J., Kowalchuk G. A., Shen Q. Root exudates drive soil-microbe-nutrient feedbacks in response to plant growth // Plant Cell Environ. 2021. Vol. 44, № 2. P. 613–628. EDN: MZFXAG. <https://doi.org/10.1111/pce.13928>
41. Saleem M., Law A.D., Moe L.A. Nicotiana roots recruit rare rhizosphere taxa as major root-inhabiting microbes // Microb. Ecol. 2016. Vol. 71, № 2. P. 469–472. EDN: ZCWQNN. <https://doi.org/10.1007/s00248-015-0672-x>
42. Arif I., Batool M., Schenk P.M. Plant Microbiome Engineering: Expected Benefits for Improved Crop Growth and Resilience // Trends Biotechnol. 2020. Vol. 38, № 12. P. 1385–1396. EDN: HIYOZQ. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.04.015>
43. Gu Y., Wei Z., Wang X., Friman V.-P., Huang J., Wang X., Mei X., Xu Y., Shen Q., Jousset A. Pathogen invasion indirectly changes the composition of soil microbiome via shifts in root exudation profile // Biol. Fertil. Soils. 2016. Vol. 52, № 7. P. 997–1005. EDN: KBGOHB. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1136-2>
44. Carvalhais L.C., Dennis P.G., Badri D.V., Kidd B.N., Vivanco J.M., Schenk P.M. Linking Jasmonic Acid Signaling, Root Exudates, and Rhizosphere Microbiomes // Mol. Plant. Microbe Interact. 2015. Vol. 28, № 9. P. 1049–1058. EDN: SBBXQH. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-15-0016-R>
45. Bakker P., Pieterse C. M. J., de Jonge R., Berendsen R. L. The Soil-Borne Legacy // Cell. 2018. Vol. 172, № 6. P. 1178–1180. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.024>
46. Rolfe S.A., Griffiths J., Ton J. Crying out for help with root exudates: adaptive mechanisms by which stressed plants assemble health-promoting soil microbiomes // Curr. Opin. Microbiol. 2019. Vol. 49. P. 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2019.10.003>
47. Gao M., Xiong C., Gao C., Tsui C.K.M., Wang M.-M., Zhou X., Zhang A.-M., Cai L. Disease-induced changes in plant microbiome assembly and functional adaptation // Microbiome. 2021. Vol. 9, № 1. Art. 187. EDN: MDNWZY. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01138-2>
48. Raaijmakers J.M., Mazzola M. Ecology. Soil immune responses // Science. 2016. Vol. 352, № 6292. P. 1392–1393. <https://doi.org/10.1126/science.aaf3252>
49. Rudrappa T., Czymmek K.J., Paré P.W., Bais H.P. Root-Secreted Malic Acid Recruits Beneficial Soil Bacteria // Plant Physiol. 2008. Vol. 148, № 3. P. 1547–1556. <https://doi.org/10.1104/pp.108.127613>
50. Vives-Peris V., de Ollas C., Gómez-Cadenas A., Pérez-Clemente R.M. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond // Plant Cell Rep. 2020. Vol. 39, № 1. P. 3–17. EDN: GIESOH. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02447-5>
51. Bonfante P., Anca I.-A. Plants, mycorrhizal fungi, and bacteria: a network of interactions // Annu Rev. Microbiol. 2009. Vol. 63. P. 363–383. EDN: NBZZZF. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.091208.073504>
52. Poole P., Ramachandran V., Terpolilli J. Rhizobia: from saprophytes to endosymbionts // Nat. Rev. Microbiol. 2018. Vol. 16, № 5. P. 291–303. EDN: SESWDJ. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.171>
53. Bacilio-Jiménez M., Aguilar-Flores S., Ventura-Zapata E., Pérez-Campos E., Bouquelet S., Zenteno E. Chemical characterization of root exudates from rice (*Oryza sativa*) and their effects on the chemotactic response of endophytic bacteria // Plant Soil. 2003. Vol. 249. P. 271–277. EDN: GXZDTK. <https://doi.org/10.1023/A:1022888900465>
54. Kumar R., Bhatia R., Kukreja K., Behl R.K., Dudeja S.S., Narula N. Establishment of *Azotobacter* on plant roots: chemotactic response, development and analysis of root exudates of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) // J. Basic Microbiol. 2007. Vol. 47, № 5. P. 436–439. <https://doi.org/10.1002/jobm.200610285>
55. Mandimba G., Heulin T., Bally R., Guckert A., Balandreau J. Chemotaxis of free-living nitrogen-fixing bacteria towards maize mucilage // Plant Soil. 1986. Vol. 90. P. 129–139. EDN: TJVCFG. <https://doi.org/10.1007/bf02277392>
56. Lopez-de-Victoria G., Lovell C.R. Chemotaxis of *Azospirillum* Species to Aromatic Compounds // Appl. Environ. Microbiol. 1993. Vol. 59, № 9. P. 2951–2955. <https://doi.org/10.1128/aem.59.9.2951-2955.1993>
57. Finkemeier I., Sweetlove L.J. The role of malate in plant homeostasis // F1000 Biol Rep. 2009. Vol. 1. Art. 47. <https://doi.org/10.3410/B1-47>

58. Reinhold B., Hurek T., Fendrik I. Strain-specific chemotaxis of *Azospirillum* spp. // *J. Bacteriol.* 1985. Vol. 162, № 1. P. 190–195. <https://doi.org/10.1128/jb.162.1.190-195.1985>
59. Volpin H., Burdman S., Castro-Sowinski S., Kapulnik Y., Okon Y. Inoculation with *Azospirillum* increased exudation of rhizobial nod-gene inducers by alfalfa roots // *Mol. Plant Microbe Interact.* 1996. Vol. 9, № 5. P. 388–394. <https://doi.org/10.1094/MPMI-9-0388>
60. Dardanelli M.S., Manyani H., González-Barroso S., Rodríguez-Carvajal M.A., Gil-Serrano A.M., Espuny M.R., López-Baena F.J., Bellogín R.A., Megías M., Ollero F.J. Effect of the presence of the plant growth promoting rhizobacterium (PGPR) *Chryseobacterium balustinum* Aur9 and salt stress in the pattern of flavonoids exuded by soybean roots // *Plant Soil.* 2010. Vol. 328. P. 483–493. EDN: HLIIVPL. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0127-6>
61. Walker V., Bertrand C., Bellvert F., Moëgne-Loccoz Y., Bally R., Comte G. Host plant secondary metabolite profiling shows a complex, strain-dependent response of maize to plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Azospirillum* // *New Phytol.* 2011. Vol. 189, № 2. P. 494–506. EDN: OARTKJ. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03484.x>
62. Nasir F., Shi S., Tian L., Chang C., Ma L., Li X., Gao Y., Tian C. Strigolactones shape the rhizomicrobiome in rice (*Oryza sativa*) // *Plant Sci.* 2019. Vol. 286. P. 118–133. EDN: OPTAPL. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.05.016>
63. Liu F., Rice J.H., Lopes V., Grewal P., Lebeis S.L., Hewezi T., Staton M.E. Overexpression of Strigolactone-Associated Genes Exerts Fine-Tuning Selection on Soybean Rhizosphere Bacterial and Fungal Microbiome // *Phytobiomes J.* 2020. Vol. 4, № 3. P. 239–251. EDN: PBPXOD. <https://doi.org/10.1094/phytobiomes-01-20-0003-r>
64. Faure D., Vereecke D., Leveau J.H.J. Molecular communication in the rhizosphere // *Plant Soil.* 2009. Vol. 321, № 1–2. P. 279–303. EDN: NAJBSX. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9839-2>
65. Aliche E.B., Screpanti C., De Mesmaeker A., Munnik T., Bouwmeester H.J. Science and application of strigolactones // *New Phytol.* 2020. Vol. 227, № 4. P. 1001–1011. EDN: FZEPFD. <https://doi.org/10.1111/nph.16489>
66. Foo E., Davies N.W. Strigolactones promote nodulation in pea // *Planta.* 2011. Vol. 234, № 5. P. 1073–1081. EDN: PGGRXR. <https://doi.org/10.1007/s00425-011-1516-7>
67. Rehman N., Ali M., Ahmad M.Z., Liang G., Zhao J. Strigolactones promote rhizobia interaction and increase nodulation in soybean (*Glycine max*) // *Microb. Pathog.* 2018. Vol. 114. P. 420–430. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.11.049>
68. Peláez-Vico M., Bernabéu-Roda L., Kohlen W., Soto M., López-Ráez J. Strigolactones in the Rhizobium-legume symbiosis: Stimulatory effect on bacterial surface motility and down-regulation of their levels in nodulated plants // *Plant Sci.* 2016. Vol. 245. P. 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.012>
69. Suzuki A., Akune M., Kogiso M., Imagama Y., Osuki K.-I., Uchiumi T., Higashi S., Han S.-Y., Yoshida S., Asami T., Abe M. Control of nodule number by the phytohormone abscisic acid in the roots of two leguminous species // *Plant Cell Physiol.* 2004. Vol. 45, № 7. P. 914–922. EDN: IVQJRD. <https://doi.org/10.1093/pch/107>
70. Ding Y., Kalo P., Yendrek C., Sun J., Liang Y., Marsh J.F., Harris J.M., Oldroyd G.E.D. Abscisic acid coordinates nod factor and cytokinin signaling during the regulation of nodulation in *Medicago truncatula* // *Plant Cell.* 2008. Vol. 20, № 10. P. 2681–2695. <https://doi.org/10.1105/tpc.108.061739>
71. Belimov A.A., Dodd I.C., Safronova V.I., Dumova V.A., Shaposhnikov A.I., Ladatko A.G., Davies W.J. Abscisic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth // *Plant Physiol Biochem.* 2014. Vol. 74. P. 84–91. EDN: SKKCNL. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.032>
72. Leveau J.H.J., Lindow S.E. Utilization of the plant hormone indole-3-acetic acid for growth by *Pseudomonas putida* strain 1290 // *Appl. Environ. Microbiol.* 2005. Vol. 71, № 5. P. 2365–2371. <https://doi.org/10.1128/aem.71.5.2365-2371.2005>
73. Van der Meij A., Willemsse J., Schneijderberg M.A., Geurts R., Raaijmakers J.M., van Wezel G.P. Inter- and intracellular colonization of *Arabidopsis* roots by endophytic actinobacteria and the impact of plant hormones on their antimicrobial activity // *Antonie Van Leeuwenhoek.* 2018. Vol. 111, № 5. P. 679–690. EDN: YXLKZU. <https://doi.org/10.1007/s10482-018-1014-z>
74. Ding Y., Sun T., Ao K., Peng Y., Zhang Y., Li X., Zhang Y. Opposite Roles of Salicylic Acid Receptors NPR1 and NPR3/NPR4 in Transcriptional Regulation of Plant Immunity // *Cell.* 2018. Vol. 173, № 6. P. 1454–1467.e15. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.03.044>
75. Li N., Han X., Feng D., Yuan D., Huang L.-J. Signaling Crosstalk between Salicylic Acid and Ethylene/Jasmonate in Plant Defense: Do We Understand What They Are Whispering? // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. Vol. 20, № 3. Art. 671. <https://doi.org/10.3390/ijms20030671>
76. Chen X., Marszałkowska M., Reinhold-Hurek B. Jasmonic acid, not salicylic acid restricts endophytic root colonization of rice // *Front Plant Sci.* 2019. Vol. 10. Art. 1758. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01758>
77. Carvalhais L., Dennis P., Badri D., Tyson G., Vivanco J., Schenk P. Activation of the jasmonic acid plant defence pathway alters the composition of rhizosphere bacterial communities // *PLoS One.* 2013. Vol. 8, № 2. Art. e56457. EDN: RKVRKT. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056457>

78. Schreiner M., Krumbein A., Knorr D., Smetanska I. Enhanced glucosinolates in root exudates of *Brassica rapa* ssp. *rapa* mediated by salicylic acid and methyl jasmonate // *J. Agric. Food Chem.* 2011. Vol. 59, № 4. P. 1400–1405. EDN: OBXTAR. <https://doi.org/10.1021/jf103585s>
79. Santoyo G., Moreno-Hagelsieb G., Orozco-Mosqueda M. d. C., Glick B. Plant growth-promoting bacterial endophytes // *Microbiol. Res.* 2016. Vol. 183. P. 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>
80. Brader G., Compant S., Mitter B., Trognitz F., Sessitsch A. Metabolic potential of endophytic bacteria // *Curr. Opin. Biotechnol.* 2014. Vol. 27, № 100. P. 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.012>
81. Liu H., Carvalhais L., Crawford M., Singh E., Dennis P., Pieterse C., Schenk P. Inner plant values: diversity, colonization and benefits from endophytic bacteria // *Front. Microbiol.* 2017. Vol. 8. Art. 2552. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02552>
82. Kendall K., Roberts A.D. Van der Waals forces influencing adhesion of cells // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2015. Vol. 370, № 1661. Art. 20140078. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0078>
83. Rodríguez-Navarro D.N., Dardanelli M.S., Ruiz-Sainz J.E. Attachment of bacteria to the roots of higher plants // *FEMS Microbiol. Lett.* 2007. Vol. 272, № 2. P. 127–136. EDN: LSSJYT. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00761.x>
84. Berne C., Ducret A., Hardy G.G., Brun Y.V. Adhesins involved in attachment to abiotic surfaces by Gram-negative bacteria // *Microbiol. Spectr.* 2015. Vol. 3, № 4. EDN: YXHVMH. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.MB-0018-2015>
85. Wheatley R.M., Poole P.S. Mechanisms of bacterial attachment to roots // *FEMS Microbiol. Rev.* 2018. Vol. 42, № 4. P. 448–461. EDN: ISFRXO. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuy014>
86. Rossi F., Medeot D., Liaudat J., Pistorio M., Jofré E. In *Azospirillum brasilense*, mutations in *flmA* or *flmB* genes affect polar flagellum assembly, surface polysaccharides, and attachment to maize roots // *Microbiol. Res.* 2016. Vol. 190. P. 55–62. EDN: WTQPUH. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.05.006>
87. Cooley M.B., Miller W.G., Mandrell R.E. Colonization of *Arabidopsis thaliana* with *Salmonella enterica* and Enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 and competition by *Enterobacter asburiae* // *Appl. Environ. Microbiol.* 2003. Vol. 69, № 8. P. 4915–4926. <https://doi.org/10.1128/aem.69.8.4915-4926.2003>
88. Donlan R.M. Biofilms: microbial life on surfaces // *Emerg Infect Dis.* 2002. Vol. 8, № 9. P. 881–890. <https://doi.org/10.3201/eid0809.020063>
89. Tan M.S.F., White A.P., Rahman S., Dykes G.A. Role of fimbriae, flagella and cellulose on the attachment of *Salmonella Typhimurium* ATCC 14028 to plant cell wall models // *PLoS One.* 2016. Vol. 11, № 6. Art. e0158311. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158311>
90. Monteiro R., Balsanelli E., Tuleski T., Faoro H., Cruz L., Wassem R., Baura V. d., Tadra-Sfeir M., Weiss V., DaRocha W., Muller-Santos M., Chubatsu L., Huergo L., Pedrosa F., Souza E.D. Genomic comparison of the endophyte *Herbaspirillum seropedicae* SmR1 and the phytopathogen *Herbaspirillum rubrisubalbicans* M1 by suppressive subtractive hybridization and partial genome sequencing // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2012. Vol. 80, № 2. P. 441–451. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2012.01309.x>
91. Kandel S.L., Joubert P.M., Doty S.L. Bacterial endophyte colonization and distribution within plants // *Microorganisms.* 2017. Vol. 5, № 4. Art. 77. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5040077>
92. Thompson M.A., Onyeziri M.C., Fuqua C. Function and regulation of *Agrobacterium tumefaciens* cell surface structures that promote attachment // *Curr. Top. Microbiol. Immunol.* 2018. Vol. 418. P. 143–184. EDN: WVPZTF. https://doi.org/10.1007/82_2018_96
93. Hinsä S.M., Espinosa-Urgel M., Ramos J.L., O'Toole G.A. Transition from reversible to irreversible attachment during biofilm formation by *Pseudomonas fluorescens* WCS365 requires an ABC transporter and a large secreted protein // *Mol. Microbiol.* 2003. Vol. 49, № 4. P. 905–918. EDN: ETQOMR. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.2003.03615.x>
94. Ramey B.E., Koutsoudis M., von Bodman S.B., Fuqua C. Biofilm formation in plant-microbe associations // *Curr. Opin. Microbiol.* 2004. Vol. 7, № 6. P. 602–609. EDN: LNVKOZ. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2004.10.014>
95. Russo D.M., Williams A., Edwards A., Posadas D.M., Finnie C., Dankert M., Downie J.A., Zorreguieta A. Proteins exported via the PrsD-PrsE type I secretion system and the acidic exopolysaccharide are involved in biofilm formation by *Rhizobium leguminosarum* // *J. Bacteriol.* 2006. Vol. 188, № 12. P. 4474–4486. EDN: XUCLSL. <https://doi.org/10.1128/JB.00246-06>
96. Davey M.E., O'Toole G.A. Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2000. Vol. 64, № 4. P. 847–867. <https://doi.org/10.1128/mmbr.64.4.847-867.2000>
97. Branda S.S., Vik S., Friedman L., Kolter R. Biofilms: the matrix revisited // *Trends Microbiol.* 2005. Vol. 13, № 1. P. 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.11.006>
98. Flemming H.-C., Wingender J. The biofilm matrix // *Nat. Rev. Microbiol.* 2010. Vol. 8, № 9. P. 623–633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
99. Gumerov V.M., Andrianova E.P., Matilla M.A., Page K.M., Monteagudo-Cascales E., Dolphin A.C., Krell T., Zhulin I. B. Amino acid sensor conserved from bacteria to humans // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2022. Vol. 119, № 10. Art. e2110415119. EDN: IBWYXK. <https://doi.org/10.1073/pnas.2110415119>

100. Ud-Din A.I.S., Khan M.F., Roujeinikova A. Broad specificity of amino acid chemoreceptor CtaA of *Pseudomonas fluorescens* is afforded by plasticity of its amphipathic ligand-binding pocket // *Mol. Plant Microbe Interact.* 2020. Vol. 33, № 4. P. 612–623. EDN: LJOQIG. <https://doi.org/10.1094/mpmi-10-19-0277-r>
101. Lamanna A.C., Gestwicki J.E., Strong L.E., Borchardt S.L., Owen R.M., Kiessling L.L. Conserved amplification of chemotactic responses through chemoreceptor interactions // *J. Bacteriol.* 2002. Vol. 184, № 18. P. 4981–4987. <https://doi.org/10.1128/jb.184.18.4981-4987.2002>
102. Yang C.-X., Chen S.-J., Hong X.-Y., Wang L.-Z., Wu H.-M., Tang Y.-Y., Gao Y.-Y., Hao G.-F. Plant exudates-driven microbiome recruitment and assembly facilitates plant health management // *FEMS Microbiol. Rev.* 2025. Vol. 49. Art. fuaf008. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaf008>
103. Feng H., Zhang N., Du W., Zhang H., Liu Y., Fu R., Shao J., Zhang G., Shen Q., Zhang R. Identification of chemotaxis compounds in root exudates and their sensing chemoreceptors in plant-growth-promoting rhizobacteria *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 // *Mol. Plant Microbe Interact.* 2018. Vol. 31, № 10. P. 995–1005. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-18-0003-R>
104. Bodhankar G.A., Tohidifar P., Foust Z.L., Ordal G.W., Rao C.V. Characterization of opposing responses to phenol by *Bacillus subtilis* chemoreceptors // *J. Bacteriol.* 2022. Vol. 204, № 4. Art. e00441-21. EDN: HIQMWP. <https://doi.org/10.1128/jb.00441-21>

References

1. Chiquito-Contreras C.J., Meza-Menchaca T., Guzmán-López O., Vásquez E.C., Ricaño-Rodríguez J. Molecular insights into plant-microbe interactions: A comprehensive review of key mechanisms. *Front. Biosci.-Elite.* 2024;16(1):9. EDN: QJNJUF. <https://doi.org/10.31083/j.fbe1601009>
2. Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annu. Rev. Microbiol.* 2009;63(1):541-556. EDN: NCADVP. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>
3. Park I., Seo Y.S., Manna M. Recruitment of the rhizo-microbiome army: assembly determinants and engineering of the rhizosphere microbiome as a key to unlocking plant potential. *Front. Microbiol.* 2023;14:1163832. EDN: QCXUVB. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1163832>
4. Compant S., Samad A., Faist H., Sessitsch A. A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *J. Adv. Res.* 2019;19:29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
5. Luo C., He Y., Chen Y. Rhizosphere microbiome regulation: Unlocking the potential for plant growth. *Curr. Res. Microb. Sci.* 2024;8:100322. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100322>
6. Reinhold-Hurek B., Bünger W., Burbano C.S., Sabale M., Hurek T. Roots shaping their microbiome: global hotspots for microbial activity. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2015;53:403-424. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102342>
7. Liu F., Hewezi T., Lebeis S.L., Pantalone V., Grewal P.S., Staton M.E. Soil indigenous microbiome and plant genotypes cooperatively modify soybean rhizosphere microbiome assembly. *BMC Microbiol.* 2019;19(1):201. EDN: OQVFMI. <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1572-x>
8. Brown S.P., Grillo M.A., Podowski J.C., Heath K.D. Soil origin and plant genotype structure distinct microbiome compartments in the model legume *Medicago truncatula*. *Microbiome.* 2020;8(1):139. EDN: RWHOCD. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00915-9>
9. Benaissa A., Djebbar R., Abderrahmani A. Antagonistic effect of plant growth promoting rhizobacteria associated with *Rhus tripartita* on gram positive and negative bacteria. *Analele Universității din Oradea, Seria Relații Internaționale și Studii Europene.* 2019;26(2):67-72. EDN: NSMYSH.
10. Glick B.R. *Beneficial Plant-Bacterial Interactions*. Cham: Springer; 2020. 383 p.
11. Mhlongo M.I., Piater L.A., Madala N.E., Labuschagne N., Dubery I.A. The Chemistry of Plant-Microbe Interactions in the Rhizosphere and the Potential for Metabolomics to Reveal Signaling Related to Defense Priming and Induced Systemic Resistance. *Front. Plant Sci.* 2018;9:112. EDN: YGNSST. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00112>
12. Peiffer J.A., Spor A., Koren O., Jin Z., Tringe S.G., Dangi J.L., Buckler E.S., Ley R.E. Diversity and heritability of the maize rhizosphere microbiome under field conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2013;110(16):6548-6553. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302837110>
13. Bulgarelli D., Garrido-Oter R., Münch P. C., Weiman A., Dröge J., Pan Y., McHardy A. C., Schulze-Lefert P. Structure and Function of the Bacterial Root Microbiota in Wild and Domesticated Barley. *Cell Host Microbe.* 2015;17(3):392-403. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2015.01.011>
14. Cheng Z., Lei S., Li Y., Huang W., Ma R., Xiong J., Zhang T., Jin L., Haq H., Xu X., Tian B. Revealing the Variation and Stability of Bacterial Communities in Tomato Rhizosphere Microbiota. *Microorganisms.* 2020;8(2):170. EDN: HBOYZS. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020170>
15. Tkacz A., Bestion E., Bo Z., Hortala M., Poole P. S. Influence of Plant Fraction, Soil, and Plant Species on Microbiota: a Multikingdom Comparison. *mBio.* 2020;11(1):e02785-19. EDN: VFUQZW. <https://doi.org/10.1128/mbio.02785-19>

16. Schröder P., Hartmann A. New developments in rhizosphere research. *J. Soils Sediments*. 2003;3(4):227-227. EDN: DXYEVV. <https://doi.org/10.1007/bf02988661>
17. Ling N., Wang T., Kuzyakov Y. Rhizosphere bacteriome structure and functions. *Nat. Commun*. 2022;13(1):836. EDN: BHMRFQ. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28448-9>
18. Fu X., Huang Y., Fu Q., Qiu Y., Zhao J., Li J., Wu X., Yang Y., Liu H., Yang X., Chen H. Critical transition of soil microbial diversity and composition triggered by plant rhizosphere effects. *Front. Plant Sci*. 2023;14:1252821. EDN: QLXIYB. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1252821>
19. Shi S., Nuccio E., Herman D. J., Rijkers R., Estera K., Li J., Rocha U. N. d., He Z., Pett-Ridge J., Brodie E.L., Zhou J., Firestone M. Successional Trajectories of Rhizosphere Bacterial Communities over Consecutive Seasons. *mBio*. 2015;6(4):e00746. <https://doi.org/10.1128/mbio.00746-15>
20. Cordovez V., Rotoni C., Dini-Andreote F., Oyserman B., Carrión V.J., Raaijmakers J. M. Successive plant growth amplifies genotype-specific assembly of the tomato rhizosphere microbiome. *Sci. Total Environ*. 2021;772:144825. EDN: PGJSOD. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144825>
21. Zhong C., Gao T., Bai N. Multi-omics profiling reveals comprehensive microbe-plant-metabolite regulation patterns for medicinal plant *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. *Plant. Biotechnol. J*. 2022;20(10):1874-1887. EDN: MAZLQY. <https://doi.org/10.1111/pbi.13868>
22. Xu D., Yu X., Yang J., Zhao X., Bao Y. High-Throughput Sequencing Reveals the Diversity and Community Structure in Rhizosphere Soils of Three Endangered Plants in Western Ordos, China. *Curr. Microbiol*. 2020;77(10):2713-2723. EDN: FDPYUQ. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02054-8>
23. Castellano-Hinojosa A., Albrecht U., Strauss S.L. Interactions between rootstocks and compost influence the active rhizosphere bacterial communities in citrus. *Microbiome*. 2023;11(1):79. EDN: IGUFYS. <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01524-y>
24. Zhou Y., Ma J., Yang J., Lv Z., Song Z., Han H. Soybean rhizosphere microorganisms alleviate Mo nano-materials induced stress by improving soil microbial community structure. *Chemosphere*. 2023;310:136784. EDN: IXCWML. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136784>
25. Su L., Wang G., Shu S., Wang D., Liu K., Zhang S. Composition, function and succession of bacterial communities in the tomato rhizosphere during continuous cropping. *Biol. Fertil. Soils*. 2023;59(7):723-732. EDN: YAJAGM. <https://doi.org/10.1007/s00374-023-01731-7>
26. Escudero-Martinez C., Coulter M., Alegria Terrazas R., Foito A., Kapadia R., Pietrangelo L., Maver M., Sharma R., Aprile A., Morris J., Hedley P. E., Maurer A., Pillen K., Naclerio G., Mimmo T., Barton G. J., Waugh R., Abbott J., Bulgarelli D. Identifying plant genes shaping microbiota composition in the barley rhizosphere. *Nat. Commun*. 2022;13(1):3443. EDN: JCLKYF. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31022-y>
27. Oyserman B.O., Flores S.S., Griffioen T., Pan X., van der Wijk E., Pronk L., Lokhorst W., Nurfikari A., Paulson J. N., Movassagh M., Stopnisek N., Kupczok A., Cordovez V., Carrión V.J., Ligterink W., Snoek B.L., Medema M.H., Raaijmakers J.M. Disentangling the genetic basis of rhizosphere microbiome assembly in tomato. *Nat. Commun*. 2022;13(1):3228. EDN: FIEMQC. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30849-9>
28. Shi J., Zhao B., Zheng S., Zhang X., Wang X., Dong W., Xie Q., Wang G., Xiao Y., Chen F., Yu N., Wang E. A phosphate starvation response-centered network regulates mycorrhizal symbiosis. *Cell*. 2021;184(22):5527-5540.e18. EDN: RICXUW. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.09.030>
29. Estabrook E.M., Yoder J.I. Plant-plant communications: rhizosphere signaling between parasitic angiosperms and their hosts. *Plant Physiol*. 1998;116(1):1-7.
30. Li M., Song Z., Li Z., Qiao R., Zhang P., Ding C., Xie J., Chen Y., Guo H. Populus root exudates are associated with rhizosphere microbial communities and symbiotic patterns. *Front. Microbiol*. 2022;13:1042944. EDN: IRYRXL. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1042944>
31. Sasse J., Martinoia E., Northen T. Feed Your Friends: Do Plant Exudates Shape the Root Microbiome? *Trends Plant Sci*. 2018;23(1):25-41. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.003>
32. Upadhyay S.K., Srivastava A.K., Rajput V.D., Chauhan P.K., Bhojiya A.A., Jain D., Chaubey G., Dwivedi P., Sharma B., Minkina T. Root exudates: mechanistic insight of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable crop production. *Front. Microbiol*. 2022;13:916488. EDN: LKLFQY. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.916488>
33. Trovato M., Funck D., Forlani G., Okumoto S., Amir R. Editorial: amino acids in plants: regulation and functions in development and stress defense. *Front. Plant Sci*. 2021;12:772810. EDN: TUSSLF. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.772810>
34. Feng H., Fu R., Hou X., Lv Y., Zhang N., Liu Y., Xu Z., Miao Y., Krell T., Shen Q., Zhang R. Chemotaxis of beneficial rhizobacteria to root exudates: The first step towards root-microbe rhizosphere interactions. *Int. J. Mol. Sci*. 2021;22(13):6655. EDN: QYPJQZ. <https://doi.org/10.3390/ijms22136655>
35. Yang K., Fu R., Feng H., Jiang G., Finkel O., Sun T., Liu M., Huang B., Li S., Wang X., Yang T., Wang Y., Wang S., Xu Y., Shen Q., Friman V.-P., Jousset A., Wei Z. RIN enhances plant disease resistance via root exudate-mediated assembly of disease-suppressive rhizosphere microbiota. *Mol. Plant*. 2023;16(9):1379-1395. EDN: PNELEI. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.08.004>

36. Korenblum E., Dong Y., Szymanski J., Panda S., Jozwiak A., Massalha H., Meir S., Rogachev I., Aharoni A. Rhizosphere microbiome mediates systemic root metabolite exudation by root-to-root signaling. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2020;117(7):3874-3883. EDN: TQZVAE. <https://doi.org/10.1073/pnas.1912130117>
37. Chaparro J.M., Badri D.V., Vivanco J.M. Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development. *ISME J*. 2014;8(4):790-803. EDN: SSQFKR. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.196>
38. Haichar F. e. Z., Marol C., Berge O., Rangel-Castro J.I., Prosser J.I., Balesdent J., Heulin T., Achouak W. Plant host habitat and root exudates shape soil bacterial community structure. *ISME J*. 2008;2(12):1221-1230.
39. Dennis P.G., Miller A.J., Hirsch P.R. Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? *FEMS Microbiol. Ecol*. 2010;72(3):313-327. EDN: MYPOEP. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x>
40. Zhao M., Zhao J., Yuan J., Hale L., Wen T., Huang Q., Vivanco J.M., Zhou J., Kowalchuk G. A., Shen Q. Root exudates drive soil-microbe-nutrient feedbacks in response to plant growth. *Plant Cell Environ*. 2021;44(2):613-628. EDN: MZFXAG. <https://doi.org/10.1111/pce.13928>
41. Saleem M., Law A.D., Moe L.A. Nicotiana roots recruit rare rhizosphere taxa as major root-inhabiting microbes. *Microb. Ecol*. 2016;71(2):469-472. EDN: ZCWQNN. <https://doi.org/10.1007/s00248-015-0672-x>
42. Arif I., Batool M., Schenk P.M. Plant Microbiome Engineering: Expected Benefits for Improved Crop Growth and Resilience. *Trends Biotechnol*. 2020;38(12):1385-1396. EDN: HIYOZQ. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.04.015>
43. Gu Y., Wei Z., Wang X., Friman V.-P., Huang J., Wang X., Mei X., Xu Y., Shen Q., Jousset A. Pathogen invasion indirectly changes the composition of soil microbiome via shifts in root exudation profile. *Biol. Fertil. Soils*. 2016;52(7):997-1005. EDN: KBGOHB. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1136-2>
44. Carvalhais L.C., Dennis P.G., Badri D.V., Kidd B.N., Vivanco J.M., Schenk P.M. Linking Jasmonic Acid Signaling, Root Exudates, and Rhizosphere Microbiomes. *Mol. Plant. Microbe Interact*. 2015;28(9):1049-1058. EDN: SBBXQH. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-15-0016-R>
45. Bakker P., Pieterse C. M. J., de Jonge R., Berendsen R. L. The Soil-Borne Legacy. *Cell*. 2018;172(6):1178-1180. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.024>
46. Rolfé S.A., Griffiths J., Ton J. Crying out for help with root exudates: adaptive mechanisms by which stressed plants assemble health-promoting soil microbiomes. *Curr. Opin. Microbiol*. 2019;49:73-82. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2019.10.003>
47. Gao M., Xiong C., Gao C., Tsui C.K.M., Wang M.-M., Zhou X., Zhang A.-M., Cai L. Disease-induced changes in plant microbiome assembly and functional adaptation. *Microbiome*. 2021;9(1):187. EDN: MDNWZY. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01138-2>
48. Raaijmakers J.M., Mazzola M. Ecology. Soil immune responses. *Science*. 2016;352(6292):1392-1393. <https://doi.org/10.1126/science.aaf3252>
49. Rudrappa T., Czymmek K.J., Paré P.W., Bais H.P. Root-Secreted Malic Acid Recruits Beneficial Soil Bacteria. *Plant Physiol*. 2008;148(3):1547-1556. <https://doi.org/10.1104/pp.108.127613>
50. Vives-Peris V., de Ollas C., Gómez-Cadenas A., Pérez-Clemente R.M. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. *Plant Cell Rep*. 2020;39(1):3-17. EDN: GIESOH. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02447-5>
51. Bonfante P., Anca I.-A. Plants, mycorrhizal fungi, and bacteria: a network of interactions. *Annu. Rev. Microbiol*. 2009;63:363-383. EDN: NBZZZF. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.091208.073504>
52. Poole P., Ramachandran V., Terpolilli J. Rhizobia: from saprophytes to endosymbionts. *Nat. Rev. Microbiol*. 2018;16(5):291-303. EDN: SESWDJ. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.171>
53. Bacilio-Jiménez M., Aguilar-Flores S., Ventura-Zapata E., Pérez-Campos E., Bouquelet S., Zenteno E. Chemical characterization of root exudates from rice (*Oryza sativa*) and their effects on the chemotactic response of endophytic bacteria. *Plant Soil*. 2003;249:271-277. EDN: GXZDTK. <https://doi.org/10.1023/A:1022888900465>
54. Kumar R., Bhatia R., Kukreja K., Behl R.K., Dudeja S.S., Narula N. Establishment of *Azotobacter* on plant roots: chemotactic response, development and analysis of root exudates of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Basic Microbiol*. 2007;47(5):436-439. <https://doi.org/10.1002/jobm.200610285>
55. Mandimba G., Heulin T., Bally R., Guckert A., Balandreau J. Chemotaxis of free-living nitrogen-fixing bacteria towards maize mucilage. *Plant Soil*. 1986;90:129-139. EDN: TJVCFG. <https://doi.org/10.1007/bf02277392>
56. Lopez-de-Victoria G., Lovell C.R. Chemotaxis of *Azospirillum* Species to Aromatic Compounds. *Appl. Environ. Microbiol*. 1993;59(9):2951-2955. <https://doi.org/10.1128/aem.59.9.2951-2955.1993>
57. Finkemeier I., Sweetlove L.J. The role of malate in plant homeostasis. *F1000 Biol Rep*. 2009;1:47. <https://doi.org/10.3410/B1-47>
58. Reinhold B., Hurek T., Fendrik I. Strain-specific chemotaxis of *Azospirillum* spp. *J. Bacteriol*. 1985;162(1):190-195. <https://doi.org/10.1128/jb.162.1.190-195.1985>
59. Volpin H., Burdman S., Castro-Sowinski S., Kapulnik Y., Okon Y. Inoculation with *Azospirillum* increased exudation of rhizobial nod-gene inducers by alfalfa roots. *Mol. Plant Microbe Interact*. 1996;9(5):388-394. <https://doi.org/10.1094/MPMI-9-0388>

60. Dardanelli M.S., Manyani H., González-Barroso S., Rodríguez-Carvajal M.A., Gil-Serrano A.M., Espuny M.R., López-Baena F.J., Bellogín R.A., Megías M., Ollero F.J. Effect of the presence of the plant growth promoting rhizobacterium (PGPR) *Chryseobacterium balustinum* Aur9 and salt stress in the pattern of flavonoids exuded by soybean roots. *Plant Soil*. 2010;328:483-493. EDN: HLIVPL. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0127-6>
61. Walker V., Bertrand C., Bellvert F., Moëgne-Loccoz Y., Bally R., Comte G. Host plant secondary metabolite profiling shows a complex, strain-dependent response of maize to plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Azospirillum*. *New Phytol*. 2011;189(2):494-506. EDN: OARTKJ. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03484.x>
62. Nasir F., Shi S., Tian L., Chang C., Ma L., Li X., Gao Y., Tian C. Strigolactones shape the rhizomicrobiome in rice (*Oryza sativa*). *Plant Sci*. 2019;286:118-133. EDN: OPTAPL. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.05.016>
63. Liu F., Rice J.H., Lopes V., Grewal P., Lebeis S.L., Hewezi T., Staton M.E. Overexpression of Strigolactone-Associated Genes Exerts Fine-Tuning Selection on Soybean Rhizosphere Bacterial and Fungal Microbiome. *Phytobiomes J*. 2020;4(3):239-251. EDN: PBPXOD. <https://doi.org/10.1094/phiomes-01-20-0003-r>
64. Faure D., Vereecke D., Leveau J.H.J. Molecular communication in the rhizosphere. *Plant Soil*. 2009;321(1-2):279-303. EDN: NAJBSX. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9839-2>
65. Aliche E.B., Screpanti C., De Mesmaeker A., Munnik T., Bouwmeester H.J. Science and application of strigolactones. *New Phytol*. 2020;227(4):1001-1011. EDN: FZEPFD. <https://doi.org/10.1111/nph.16489>
66. Foo E., Davies N.W. Strigolactones promote nodulation in pea. *Planta*. 2011;234(5):1073-1081. EDN: PGGRXR. <https://doi.org/10.1007/s00425-011-1516-7>
67. Rehman N., Ali M., Ahmad M.Z., Liang G., Zhao J. Strigolactones promote rhizobia interaction and increase nodulation in soybean (*Glycine max*). *Microb. Pathog.* 2018;114:420-430. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.11.049>
68. Peláez-Vico M., Bernabéu-Roda L., Kohlen W., Soto M., López-Ráez J. Strigolactones in the Rhizobium-legume symbiosis: Stimulatory effect on bacterial surface motility and down-regulation of their levels in nodulated plants. *Plant Sci*. 2016;245:119-127. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.012>
69. Suzuki A., Akune M., Kogiso M., Imagama Y., Osuki K., Uchiumi T., Higashi S., Han S.Y., Yoshida S., Asami T., Abe M. Control of nodule number by the phytohormone abscisic acid in the roots of two leguminous species. *Plant Cell Physiol*. 2004;45(7):914-922. EDN: IVQJRD. <https://doi.org/10.1093/pcp/pch107>
70. Ding Y., Kalo P., Yendrek C., Sun J., Liang Y., Marsh J.F., Harris J.M., Oldroyd G.E.D. Abscisic acid coordinates nod factor and cytokinin signaling during the regulation of nodulation in *Medicago truncatula*. *Plant Cell*. 2008;20(10):2681-2695. <https://doi.org/10.1105/tpc.108.061739>
71. Belimov A.A., Dodd I.C., Safronova V.I., Dumova V.A., Shaposhnikov A.I., Ladatko A.G., Davies W.J. Abscisic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth. *Plant Physiol. Biochem*. 2014;74:84-91. EDN: SKKCNL. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.032>
72. Leveau J.H.J., Lindow S.E. Utilization of the plant hormone indole-3-acetic acid for growth by *Pseudomonas putida* strain 1290. *Appl. Environ. Microbiol*. 2005;71(5):2365-2371. <https://doi.org/10.1128/aem.71.5.2365-2371.2005>
73. Van der Meij A., Willemsse J., Schneijderberg M A., Geurts R., Raaijmakers J.M., van Wezel G.P. Inter- and intracellular colonization of Arabidopsis roots by endophytic actinobacteria and the impact of plant hormones on their antimicrobial activity. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 2018;111(5):679-690. EDN: YXLKZU. <https://doi.org/10.1007/s10482-018-1014-z>
74. Ding Y., Sun T., Ao K., Peng Y., Zhang Y., Li X., Zhang Y. Opposite Roles of Salicylic Acid Receptors NPR1 and NPR3/NPR4 in Transcriptional Regulation of Plant Immunity. *Cell*. 2018;173(6):1454-1467.e15. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.03.044>
75. Li N., Han X., Feng D., Yuan D., Huang L.-J. Signaling Crosstalk between Salicylic Acid and Ethylene/Jasmonate in Plant Defense: Do We Understand What They Are Whispering? *Int. J. Mol. Sci*. 2019;20(3):671. <https://doi.org/10.3390/ijms20030671>
76. Chen X., Marszałkowska M., Reinhold-Hurek B. Jasmonic acid, not salicylic acid restricts endophytic root colonization of rice. *Front. Plant Sci*. 2019;10:1758. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01758>
77. Carvalhais L., Dennis P., Badri D., Tyson G., Vivanco J., Schenk P. Activation of the jasmonic acid plant defence pathway alters the composition of rhizosphere bacterial communities. *PLoS One*. 2013;8(2):e56457. EDN: RKVVRT. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056457>
78. Schreiner M., Krumbein A., Knorr D., Smetanska I. Enhanced glucosinolates in root exudates of *Brassica rapa* ssp. *rapa* mediated by salicylic acid and methyl jasmonate. *J. Agric. Food Chem*. 2011;59(4):1400-1405. EDN: OBXTAR. <https://doi.org/10.1021/jf103585s>
79. Santoyo G., Moreno-Hagelsieb G., Orozco-Mosqueda M. d. C., Glick B. Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiol. Res*. 2016;183:92-99. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>
80. Brader G., Compant S., Mitter B., Trognitz F., Sessitsch A. Metabolic potential of endophytic bacteria. *Curr. Opin. Biotechnol*. 2014;27(100):30-37. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.012>

81. Liu H., Carvalhais L., Crawford M., Singh E., Dennis P., Pieterse C., Schenk P. Inner plant values: diversity, colonization and benefits from endophytic bacteria. *Front. Microbiol.* 2017;8:2552. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02552>
82. Kendall K., Roberts A.D. Van der Waals forces influencing adhesion of cells. *Philos. Trans. R Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2015;370(1661):20140078. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0078>
83. Rodríguez-Navarro D.N., Dardanelli M.S., Ruíz-Saínz J.E. Attachment of bacteria to the roots of higher plants. *FEMS Microbiol. Lett.* 2007;272(2):127-136. EDN: LSSJYT. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00761.x>
84. Berne C., Ducret A., Hardy G.G., Brun Y.V. Adhesins involved in attachment to abiotic surfaces by Gram-negative bacteria. *Microbiol. Spectr.* 2015;3(4). EDN: YXHVMH. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.MB-0018-2015>
85. Wheatley R.M., Poole P.S. Mechanisms of bacterial attachment to roots. *FEMS Microbiol. Rev.* 2018;42(4):448-461. EDN: ISFRXO. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuy014>
86. Rossi F., Medeot D., Liaudat J., Pistorio M., Jofré E. In *Azospirillum brasilense*, mutations in *flmA* or *flmB* genes affect polar flagellum assembly, surface polysaccharides, and attachment to maize roots. *Microbiol. Res.* 2016;190:55-62. EDN: WTQPUH. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.05.006>
87. Cooley M.B., Miller W.G., Mandrell R.E. Colonization of *Arabidopsis thaliana* with *Salmonella enterica* and Enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 and competition by *Enterobacter asburiae*. *Appl. Environ. Microbiol.* 2003;69(8):4915-4926. <https://doi.org/10.1128/aem.69.8.4915-4926.2003>
88. Donlan R.M. Biofilms: microbial life on surfaces. *Emerg. Infect Dis.* 2002;8(9):881-890. <https://doi.org/10.3201/eid0809.020063>
89. Tan M.S.F., White A.P., Rahman S., Dykes G.A. Role of fimbriae, flagella and cellulose on the attachment of *Salmonella Typhimurium* ATCC 14028 to plant cell wall models. *PLoS One.* 2016;11(6):e0158311. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158311>
90. Monteiro R., Balsanelli E., Tuleski T., Faoro H., Cruz L., Wassem R., Baura V. d., Tadra-Sfeir M., Weiss V., DaRocha W., Muller-Santos M., Chubatsu L., Huergo L., Pedrosa F., Souza E.D. Genomic comparison of the endophyte *Herbaspirillum seropedicae* SmR1 and the phytopathogen *Herbaspirillum rubrisubalbicans* M1 by suppressive subtractive hybridization and partial genome sequencing. *FEMS Microbiol. Ecol.* 2012;80(2):441-451. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2012.01309.x>
91. Kandel S.L., Joubert P.M., Doty S.L. Bacterial endophyte colonization and distribution within plants. *Microorganisms.* 2017;5(4):77. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5040077>
92. Thompson M.A., Onyeziri M.C., Fuqua C. Function and regulation of *Agrobacterium tumefaciens* cell surface structures that promote attachment. *Curr. Top. Microbiol. Immunol.* 2018;418:143-184. EDN: WVPZTF. https://doi.org/10.1007/82_2018_96
93. Hinsä S.M., Espinosa-Urgel M., Ramos J.L., O'Toole G.A. Transition from reversible to irreversible attachment during biofilm formation by *Pseudomonas fluorescens* WCS365 requires an ABC transporter and a large secreted protein. *Mol. Microbiol.* 2003;49(4):905-918. EDN: ETQOMR. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.2003.03615.x>
94. Ramey B.E., Koutsoudis M., von Bodman S.B., Fuqua C. Biofilm formation in plant-microbe associations. *Curr. Opin. Microbiol.* 2004;7(6):602-609. EDN: LNVKOZ. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2004.10.014>
95. Russo D.M., Williams A., Edwards A., Posadas D.M., Finnie C., Dankert M., Downie J.A., Zorreguieta A. Proteins exported via the PrsD-PrsE type I secretion system and the acidic exopolysaccharide are involved in biofilm formation by *Rhizobium leguminosarum*. *J. Bacteriol.* 2006;188(12):4474-4486. EDN: XUCLSL. <https://doi.org/10.1128/JB.00246-06>
96. Davey M.E., O'Toole G.A. Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2000;64(4):847-867. <https://doi.org/10.1128/mmbr.64.4.847-867.2000>
97. Branda S.S., Vik S., Friedman L., Kolter R. Biofilms: the matrix revisited. *Trends Microbiol.* 2005;13(1):20-26. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.11.006>
98. Flemming H.-C., Wingender J. The biofilm matrix. *Nat. Rev. Microbiol.* 2010;8(9):623-633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
99. Gumerov V.M., Andrianova E.P., Matilla M.A., Page K.M., Monteagudo-Cascales E., Dolphin A. C., Krell T., Zhulin I. B. Amino acid sensor conserved from bacteria to humans. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2022;119(10):e2110415119. EDN: IBWYXK. <https://doi.org/10.1073/pnas.2110415119>
100. Ud-Din A.I.S., Khan M.F., Roujeinikova A. Broad specificity of amino acid chemoreceptor CtaA of *Pseudomonas fluorescens* is afforded by plasticity of its amphipathic ligand-binding pocket. *Mol. Plant Microbe Interact.* 2020;33(4):612-623. EDN: LJOQIG. <https://doi.org/10.1094/mpmi-10-19-0277-r>
101. Lamanna A.C., Gestwicki J.E., Strong L.E., Borchardt S.L., Owen R.M., Kiessling L.L. Conserved amplification of chemotactic responses through chemoreceptor interactions. *J. Bacteriol.* 2002;184(18):4981-4987. <https://doi.org/10.1128/jb.184.18.4981-4987.2002>

102. Yang C.-X., Chen S.-J., Hong X.-Y., Wang L.-Z., Wu H.-M., Tang Y.-Y., Gao Y.-Y., Hao G.-F. Plant exudates-driven microbiome recruitment and assembly facilitates plant health management. *FEMS Microbiol. Rev.* 2025;49:fuaf008. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaf008>

103. Feng H., Zhang N., Du W., Zhang H., Liu Y., Fu R., Shao J., Zhang G., Shen Q., Zhang R. Identification of chemotaxis compounds in root exudates and their sensing chemoreceptors in plant-growth-promoting rhizobacteria *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9. *Mol. Plant Microbe Interact.* 2018;31(10):995-1005. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-18-0003-R>

104. Bodhankar G.A., Tohidifar P., Foust Z.L., Ordal G.W., Rao C.V. Characterization of opposing responses to phenol by *Bacillus subtilis* chemoreceptors. *J. Bacteriol.* 2022;204(4):e00441-21. EDN: HIQMWP. <https://doi.org/10.1128/jb.00441-21>

Информация об авторах

Мария Сергеевна Мазанко – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экспериментального мутагенеза Академии биологии и медицины им. Д.И. Иванова ЮФУ.

Евгения Валерьевна Празднова – доктор биологических наук, заведующая лабораторией молекулярной генетики микробных консорциумов Академии биологии и медицины им. Д.И. Иванова ЮФУ.

Фади Фуадович Амирджанов – лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории экспериментального мутагенеза Академии биологии и медицины им. Д.И. Иванова ЮФУ.

Анжелика Борисовна Брень – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экспериментального мутагенеза Академии биологии и медицины им. Д.И. Иванова ЮФУ; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Центра агробιοтехнологии ДГТУ.

Сергей Александрович Емельянцеv – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экспериментального мутагенеза Академии биологии и медицины им. Д.И. Иванова ЮФУ.

Information about the authors

Maria S. Mazanko – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of the Research Laboratory of Experimental Mutagenesis, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Evgeniya V. Prazdnova – Doctor of Science (Biology), Head of the Laboratory of Molecular Genetics of Microbial Consortia, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Fadi F. Amirdzhanov – Laboratory Researcher of the Scientific Research Laboratory of Experimental Mutagenesis, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Anzhelika B. Bren – Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of the Research Laboratory of Experimental Mutagenesis, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU; Leading Researcher of the Research Laboratory "Center for Agrobiotechnology", DSTU.

Sergey Alexandrovich Emelyantsev – Junior Researcher of the Scientific Research Laboratory of Experimental Mutagenesis, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Статья поступила в редакцию 13.08.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 13.08.2025; approved after reviewing 09.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 631.46; 57.044

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-150-156>

ИЗМЕНЕНИЕ ЩЕЛОЧНО-КИСЛОТНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ РАЗНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ЛИТИЯ

В.Н. Сухомлинова¹, Н.А. Евстегнеева², С.И. Колесников³, А.Н. Тимошенко⁴, А.С. Русева⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ vsukh0mlinova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7625-2589>

² evstegneeva@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3133-7629>

³ kolesnikov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>

⁴ aly9215@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5589-2171>

⁵ ruseva.ann@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3908-4582>

Аннотация. Масштабы добычи лития и загрязнения им окружающей среды в последние годы резко возросли в связи с производством автомобильных литиевых аккумуляторов. В модельном эксперименте исследовано изменение щелочно-кислотных свойств трех типов почв разной буферности (чернозем обыкновенный, бурая лесная кислая почва и серопески) при загрязнении разными соединениями лития (хлорид, гидроксид, сульфат, карбонат в концентрации 15, 30, 50, 100, 125, 250 и 500 мг Li на 1 кг почвы). Выявлено, что щелочно-кислотные свойства почв изменяются в зависимости от химической формы лития, концентрации его соединений и буферности загрязненной почвы. При внесении хлорида и сульфата лития происходит подкисление почвы, гидроксида и карбоната лития – подщелачивание.

Ключевые слова: загрязнение, хлорид лития, гидроксид лития, сульфат лития, карбонат лития, щелочно-кислотные свойства почвы, чернозем обыкновенный, бурая лесная почва, серопески

Для цитирования: Сухомлинова В.Н., Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Русева А.С. Изменение щелочно-кислотных свойств почв при загрязнении разными соединениями лития // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 150–156. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-150-156>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-00535 (<https://rscf.ru/project/24-24-00535/>) в Южном федеральном университете.

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

Original article

CHANGES IN THE ALKALINE-ACID PROPERTIES OF SOILS WHEN CONTAMINATED WITH VARIOUS LITHIUM COMPOUNDS

V.N. Sukhomlinova¹, N.A. Evstegneeva², S.I. Kolesnikov³, A.N. Timoshenko⁴, A.S. Ruseva⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ vsukh0mlinova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7625-2589>

² evstegneeva@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3133-7629>

³ kolesnikov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>

⁴ aly9215@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5589-2171>

⁵ ruseva.ann@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3908-4582>

© Сухомлинова В.Н., Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Русева А.С., 2025

Abstract. The scale of lithium mining and environmental pollution has increased dramatically in recent years, due to the production of automotive lithium batteries. In a model experiment, changes in the alkaline-acid properties of three types of soils of different buffers (common chernozem, brown forest acid soil, and sulfur sands) were studied when contaminated with various compounds of lithium chloride (LiCl), hydroxide (LiOH), sulfate (Li₂SO₄), and carbonate (Li₂CO₃) at concentrations of 15, 30, 50, 100, 125, 250 and 500 mg of Li per 1 kg of soil. According to the results of the study, it was revealed that the alkaline-acid properties of soils vary depending on the chemical form of lithium, the concentration of lithium compounds and the buffering of contaminated soil. When lithium chloride and sulfate are introduced, soil acidification occurs, and when lithium hydroxide and carbonate are introduced, alkalization occurs.

Keywords: environmental pollution, lithium chloride, lithium hydroxide, lithium sulfate, lithium carbonate, alkaline-acidic properties, ordinary chernozem, brown forest soil, gray sand

For citation: Sukhomlinova V.N., Evstegneeveva N.A., Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Ruseva A.S. Changes in the Alkaline-Acid Properties of Soils When Contaminated with Various Lithium Compounds. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):150-156. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-150-156>

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-24-00535 (<https://rscf.ru/project/24-24-00535/>) at the Southern Federal University.

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

Загрязнение почв металлами по-прежнему остается одной из важнейших экологических проблем. Среди загрязняющих веществ особое значение имеет литий – легкий щелочной металл, существенно влияющий на живые организмы при нормальной концентрации, однако при её превышении он может становиться токсичным [1, 2]. Это подтверждается при изучении влияния лития на жизнеспособность бактерий *Acinetobacter calcoaceticus*. Выявлено угнетение роста микроорганизмов, связанное с ингибированием ионом лития метаболических ферментов [3]. Из-за широкого распространения литийсодержащих продуктов и проблемы утилизации литийионных аккумуляторов возникает риск его чрезмерного накопления в окружающей среде [4, 5], что требует регулярного мониторинга, исследований по токсичности и мер по предотвращению загрязнения [6]. В [7] показано, что литий губительно влияет на флору, из-за его высокой концентрации в растениях уменьшается содержание калия и фотосинтетических пигментов [8]. Однако литий может быть как удобрением, так и токсикантом в зависимости от дозы [9]. Под его влиянием у 10-дневных проростков гороха наблюдается увеличение активности нитратредуктазы и фосфорилазы [10]. Избыточное содержание соединений лития вызывает морфологические изменения в растениях, приводящие к нарушениям митоза [11]. Загрязнение литием подавляет рост редиса, сокращая длину побегов и корней в большинстве вариантов на всех изученных почвах [12].

В работах, описывающих влияние лития на ферментативную активность почв, доказано, что загрязнение почв хлоридом и гидроксидом лития приводит к снижению активности ферментов (дегидрогеназа, каталаза, инвертаза, уреазы, фосфатаза) [12, 13].

Значительное накопление лития влечет за собой также изменение физико-химических свойств почвы. При этом проблема влияния его соединений на щелочно-кислотные свойства (рН_{H2O}) почвы все еще остается недостаточно освещенной в научной литературе. В связи с этим целесообразно оценить негативное воздействие высоких концентраций лития на почвенный покров и, как следствие, на изменение его рН_{H2O}.

Цель работы – оценить изменение щелочно-кислотных свойств почв при загрязнении различными соединениями лития.

Материалы и методы

В рамках исследования в качестве объекта выбраны три типа почв разной буферности – чернозем обыкновенный, бурая лесная кислая почва, песчаные почвы черноземной зоны (серопески). Отобранные образцы почв различаются по свойствам, которые влияют на подвижность металлов и металлоидов.

Чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый, по классификации World Reference Base for Soil Resources (WRB) (2022) – *Haplic Chernozem (Loamic)*, отобран в Ботаническом саду ЮФУ (Ростов-на-Дону). Почва характеризуется следующими свойствами: содержание гумуса – 3,4 %, $pH=7,8$, тяжелосуглинистый гранулометрический состав. Бурая лесная кислая почва (*Eutric Cambisol*) [14] отобрана в Туапсинском районе Краснодарского края, на выезде из села Горское. Содержание гумуса – 4,7 %, $pH=4,4$, тяжелосуглинистый гранулометрический состав. Серопески (*Eutric Arenosol*) отбирали в ст. Верхнекундрюченской Усть-Донецкого района Ростовской области. Содержание гумуса – 2,7 %, $pH=7,3$, легкосуглинистый гранулометрический состав.

Фоновые концентрации лития в черноземе обыкновенном составляют 23,7 мг/кг, в бурой лесной почве – 24, в серопесках – 12,7.

Литий вносили в почву в виде хлорида ($LiCl$), гидроксида ($LiOH$), сульфата (Li_2SO_4) и карбоната (Li_2CO_3) в концентрации 15, 30, 50, 100, 125, 250 и 500 мг Li на 1 кг почвы, чтобы охватить полный диапазон концентраций лития, встречающихся в природных и антропогенно загрязнённых почвах. Контролем служила незагрязнённая почва с естественным фоновым содержанием элемента. На протяжении всего срока эксперимента поддерживали оптимальные условия (температура воздуха – +18–20 °C, влажность почвы – 30 %).

Оценка влияния лития на pH_{H_2O} почвы в лабораторных исследованиях проведена на 30-е сут модельного эксперимента. Измеряли pH_{H_2O} почвы с помощью pH -метра « $pH-150MI$ » в водной суспензии: 10 г почвы на 25 мл дистиллированной воды [15]. Загрязнение гидроксидом и хлоридом лития встречается значительно чаще, чем сульфатом и карбонатом лития, поэтому загрязнение этими соединениями лития исследовали на всех трех типах почв.

Результаты и обсуждение

По результатам исследования было выявлено, что щелочно-кислотные свойства почвы изменяются в зависимости от концентрации соединений лития (рисунок).

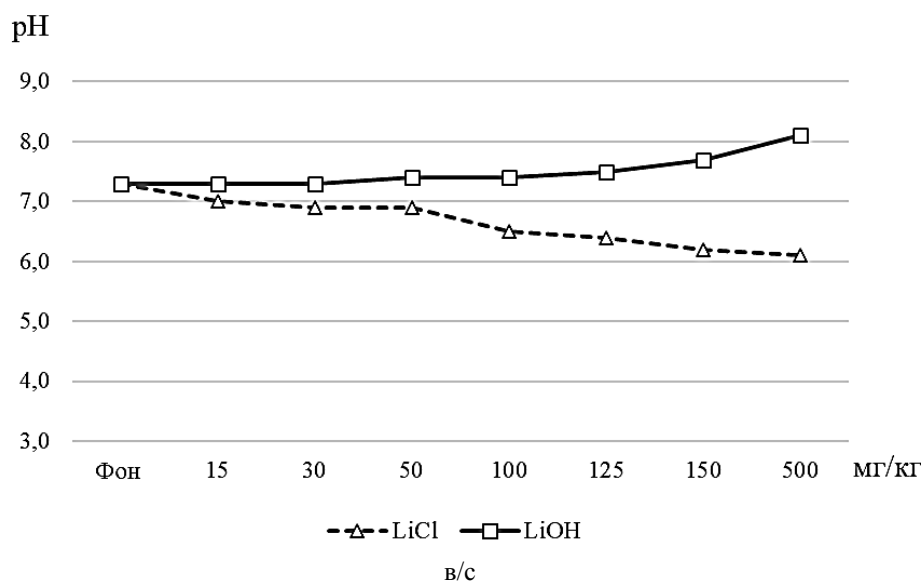
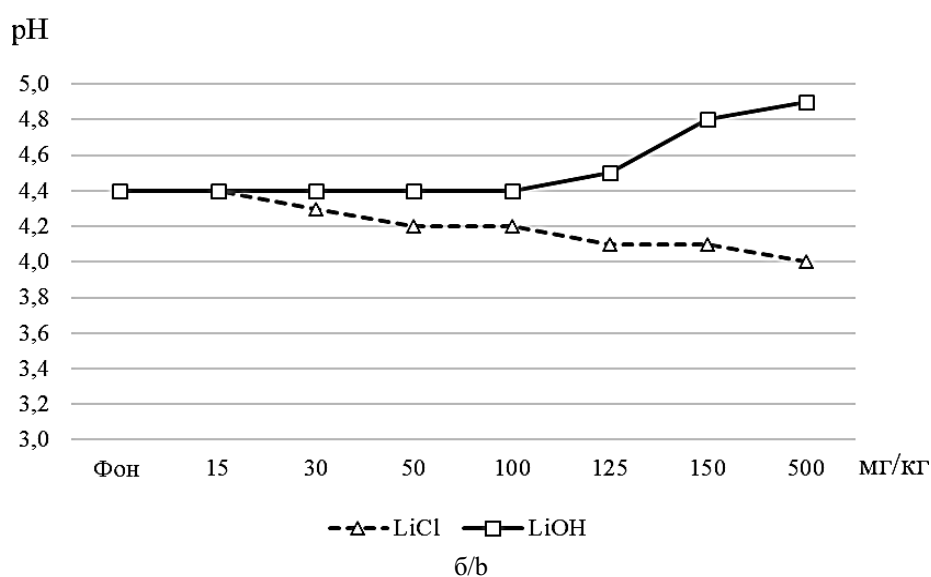
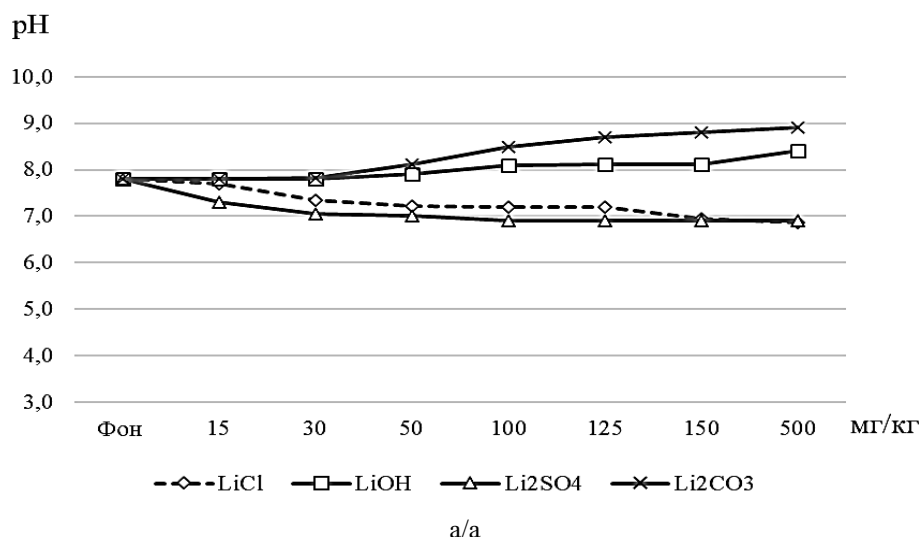
Происходит подкисление чернозема обыкновенного после загрязнения хлоридом лития. При концентрации 30 мг/кг значения показателя начинают снижаться относительно незагрязнённого образца на 5 %. Наиболее низкие значения фиксируются при внесении 500 мг/кг – происходит снижение на 12 % относительно контроля. При этом в ответ на загрязнение гидроксидом лития значения pH_{H_2O} чернозема обыкновенного повышаются и переходят в слабощелочную среду. Наиболее высокие наблюдаются при внесении концентрации 500 мг/кг гидроксида лития – происходит повышение на 16 % относительно контроля. Результаты, представленные на рис. а, отображают влияние сульфата лития и карбоната лития на pH чернозема обыкновенного. Отмечено понижение значений pH почвы при внесении лития сернокислого, начиная с концентрации 30 мг/кг – на 10 % относительно незагрязнённого образца. При внесении в почву карбоната лития значения pH смещаются в щелочную область. Максимально повышенное значение фиксируется при 500 мг/кг – на 13 % выше контроля.

В бурой лесной почве также отмечается изменение pH_{H_2O} почвы (рис. б). При внесении в почву хлорида лития происходит подкисление почвы. Максимальное снижение наблюдается при концентрации 500 мг/кг – на 8 % ниже относительно незагрязнённого образца. В ответ на внесение в почву гидроксида лития значения pH_{H_2O} сдвигаются в сторону щелочного диапазона. Максимально повышенные регистрируются при концентрации 500 мг/кг – на 12 % выше контроля.

На рис. в показаны результаты изменения pH_{H_2O} серопесков после загрязнения хлоридом и гидроксидом лития. При внесении хлорида лития в концентрации 30 мг/кг снижаются значения pH_{H_2O} почвы на 5 %, максимальное значение наблюдается при концентрации 500 мг/кг – на 16 % ниже относительно незагрязнённого образца. Внесение гидроксида лития в почву смещает pH_{H_2O} в щелочную сторону, максимальное изменение регистрируется при концентрации 500 мг/кг – на 12 % выше относительно контроля.

Таким образом, в результате исследования влияния загрязнения соединениями лития на почвы разной буферности установлено, что при внесении хлорида и сульфата лития pH_{H_2O} почв снижается, гидроксида и карбоната лития – повышается.

Полученные данные подтверждаются ранее проведенными исследованиями. Сильное подкисление может привести к необратимому растворению глинистых минералов и снижению катионообменной способности, что сопровождается ухудшением структуры почвы [16].



Изменение рН_{Н2О} почвы при загрязнении соединениями лития: а – чернозёма обыкновенного; б – бурой лесной почвы; в – серопесков / Change in рН_{Н2О} of soil contaminated with lithium compounds: a - ordinary Chernozem; b - brown forest soil; c - gray sands

Литий нарушает физико-химическое равновесие почвы, вследствие чего изменяется её pH_{H_2O} . [17]. Щелочно-кислотные свойства почвы оказывают влияние на степень доступности растениям питательных элементов, содержащихся в почве [18]. При этом высокий уровень pH_{H_2O} напрямую влияет на химическую формулу элементов, переводя многие из них в недоступные для растений соединения (P, Fe, Mn, Zn) [19]. Доказано негативное влияние на состав бактериальных сообществ как повышения, так и понижения pH_{H_2O} почвы, которые приводят к трансформации азота и изменению количества функциональных генов в микроорганизмах [20].

Заключение

В результате исследования установлено, что после загрязнения чернозема обыкновенного, бурой лесной почвы и серопесков соединениями лития изменяются их щелочно-кислотные свойства. В черноземе обыкновенном при внесении хлорида и сульфата лития значения pH_{H_2O} понижаются, гидроксида и карбоната лития – повышаются относительно контроля. В бурой лесной почве после внесения хлорида лития отмечено подкисление, гидроксида лития – повышение pH_{H_2O} относительно контрольного образца. В серопесках в ответ на внесение хлорида лития наблюдается понижение значений pH_{H_2O} относительно незагрязненного образца, а при внесении гидроксида значения повышаются.

Выявлена прямая зависимость между концентрацией соединений лития и изменением pH_{H_2O} исследованных почв.

Полученные данные могут быть использованы для оценки экологических рисков, связанных с загрязнением почв литием с различной буферной способностью.

Список источников

1. *Shakoор N., Adeel M., Azeem I., Ahmad M.A., Zain M., Abbas A., Hussain M., Jiang Y., Zhou P., Li Y., Xu M., Rui Y.* Interplay of higher plants with lithium pollution: Global trends, meta-analysis, and perspectives // *Chem.* 2023. Vol. 310. Art. 136663. EDN: RUBKGN. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136663>
2. *Xu Z., Zhang Z., Peng S., Yuan Y., Wang X.* Influences of lithium on soil properties and enzyme activities // *Chem.* 2023. Vol. 313. P. 1–3. EDN: XVXEGF. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137458>
3. *Сухомлинова В.Н., Евстегнеева Н.А., Колесников С.И.* Сравнительная оценка токсичности лития в черноземе обыкновенном и серопесках по изменению общей численности бактерий // *Наука Юга России: достижения и перспективы: тезисы докл. XXI Всерос. ежегодной молодежной науч. конф. с междунар. участием, 14–25 апреля 2025 г. Ростов н/Д.: Южный науч. центр РАН, 2025. С. 29. EDN: CSAAAH.*
4. *Губенков А.О.* Электромобили: гарантия экологической безопасности или миф? Утилизация литий-ионных аккумуляторов электромобилей – проблема экологии или современной промышленности? // *Автономия личности.* 2022. № 1. С. 162–167. EDN: YFYUGW.
5. *Kabir M.M., Demirocak D.E.* Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review // *Int. J. Energy Res.* 2017. Vol. 41. P. 1963–1986. <https://doi.org/10.1002/er.3762>
6. *Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G.* Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation - A review // *Environ. Pollut.* 2019. Vol. 249. P. 200–207. EDN: XTXGPI. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020>
7. *Виноградова С.Б.* Влияние лития на урожай и химический состав некоторых сельскохозяйственных культур: дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 153 с. EDN: NPDSOL.
8. *Török A.I., Moldovan A., Kovacs E., Cadar O., Becze A., Levei E.A., Neag E.* Lithium Accumulation in *Salvinia natans* Free-Floating Aquatic Plant // *Materials.* 2022. Vol. 15, iss. 20. Art. 7243. EDN: QAUHFY. <https://doi.org/10.3390/ma15207243>
9. *Власюк П.А.* Влияние лития на содержание и состав органических кислот в растениях семейства пасленовых // *Физиология и биохимия культурных растений.* 1973. Т. 5, № 2. С. 121–124.
10. *Позднякова М. С., Трушников Д.Ю., Францов В.О.* Влияние солей лития на развитие зернобобовых культур (на примере фасоли и нута) // *Современная наука – агропромышленному производству: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 135-летию первого среднего учебного заведения Зауралья – Александровского реального училища и 55-летию ГАУ Северного Зауралья, Тюмень, 23–24 октября 2014 г. Тюмень: Гос. агр. ун-т Северного Зауралья, 2014. Т. 1. С. 61–67.*
11. *Ягодин Б. А., Ступакова Г. А., Виноградова С. Б.* Физиологическая роль лития и факторы, влияющие на его поступление в растения // *Агробиохимия.* 1989. Т. 7. С. 116–121.
12. *Ruseva A.S., Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh.* Assessment of Lithium Ecotoxicity in Soils with Contrasting Properties // *Eurasian Soil Sci.* 2025. Vol. 58. Art. 136. EDN: NDEVRN. <https://doi.org/10.1134/S1064229325601106>

13. Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Русева А.С., Минникова Т.В. Диагностика экотоксичности лития в почвах разной буферности по активности инвертазы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-1. С. 91–97. EDN: NDEVRN. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-4-1-90-96>
14. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences, 2022. 234 p.
15. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с. EDN: XVOUSX.
16. Goulding K.W. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom // Soil Use Manag. 2016. Vol. 32. P. 390–399. <https://doi.org/10.1111/sum.12270>
17. Robinson B.H., Yalamanchali R., Reiser R., Dickinson N.M. Lithium as an emerging environmental contaminant: Mobility in the soil-plant system // Chem. 2018. Vol. 197. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.012>
18. Schofield R.K., Taylor A.W. The Measurement of Soil pH // Soil Sci. Soc. of Am. J. 1955. Vol. 19. P. 164–167. <https://doi.org/10.2136/sssaj1955.03615995001900020013x>
19. Авдонькин А. А. Потенциальная кислотность почв, зависимость от pH: дис. ... канд. биол. наук. М., 2005. 121 с. EDN: NNEARR.
20. Xiong R., He X., Gao N., Li Q., Qiu Z., Hou Y., Shen W. Soil pH amendment alters the abundance, diversity, and composition of microbial communities in two contrasting agricultural soils // Microbiol Spectr. 2024. Vol. 12, № 8. Art. e0416523. EDN: CRNWDM. <https://doi.org/10.1128/spectrum.04165-23>

References

1. Shakoor N., Adeel M., Azeem I., Ahmad M.A., Zain M., Abbas A., Hussain M., Jiang Y., Zhou P., Li Y., Xu M., Rui Y. Interplay of higher plants with lithium pollution: Global trends, meta-analysis, and perspectives. *Chem.* 2023;310:136663. EDN: RUBKGH. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136663>
2. Xu Z., Zhang Z., Peng S., Yuan Y., Wang X. Influences of lithium on soil properties and enzyme activities. *Chem.* 2023;313:1-3. EDN: XVXEFG. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137458>
3. Sukhomlinova V.N., Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I. Comparative assessment of lithium toxicity in common chernozem and sulfur sands by changes in the total number of bacteria. *Science of the South of Russia: achievements and prospects*. Abstracts of the 21st All-Russian Annual Youth Scientific Conference with international participation, April 14-25, 2025. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2025:29. (In Russ.). EDN: CSAAAH.
4. Gubenkov A. O. Electric vehicles: a guarantee of environmental safety or a myth? Is the disposal of lithium-ion batteries in electric vehicles an environmental problem or a modern industry problem? *Personal Autonomy.* 2022;(1):162-167. (In Russ.). EDN: YFYUGW.
5. Kabir M.M., Demirocak D.E. Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review. *Int. J. Energy Res.* 2017;41:1963-1986. <https://doi.org/10.1002/er.3762>
6. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation-A review. *Environ. Pollut.* 2019;249:200-207. EDN: XTXGPI. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020>
7. Vinogradova S. B. *The effect of lithium on the yield and chemical composition of some crops*. PhD thesis. Moscow, 1985. 153 p. (In Russ.). EDN: NPDSOL.
8. Török A.I., Moldovan A., Kovacs E., Cadar O., Becze A., Levei E.A., Neag E. Lithium Accumulation in *Salvinia natans* Free-Floating Aquatic Plant. *Materials.* 2022;15(20):7243. EDN: QAUHFY. <https://doi.org/10.3390/ma15207243>
9. Vlasyuk P.A. Influence of lithium on the content and composition of organic acids in plants of the Solanaceae family. *Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants.* 1973;5(2):121-124. (In Russ.).
10. Pozdnyakova M. S., Trushnikov D.Yu., Frantsov V.O. The influence of lithium salts on the development of leguminous crops (on the example of beans and chickpeas). *Modern science for agroindustrial production*. Collection of materials of the International Scientific-Practical Conference dedicated to the 135th anniversary of the first secondary educational institution of the Trans-Urals - the Alexander Real College and the 55th anniversary of the State Agrarian University of the Northern Trans-Urals, Tyumen, October 23-24, 2014. Tyumen: State Agrarian University of the Northern Urals Press; 2014;1:61-67. (In Russ.).
11. Yagodin B. A., Stupakova G. A., Vinogradova S. B. The physiological role of lithium and factors influencing its intake into plants. *Agrochemistry.* 1989;7:116-121. (In Russ.).
12. Ruseva A.S., Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Minnikova T.V., Kazeev K.S. Assessment of Lithium Ecotoxicity in Soils with Contrasting Properties. *Eurasian Soil Sci.* 2025;58:136. EDN: NDEVRN. <https://doi.org/10.1134/S1064229325601106>
13. Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Ruseva A.S., Minnikova T.V. Diagnostics of lithium ecotoxicity in soils of different buffering by invertase activity. *Bulletin of Higher Educational Institutions.*

North Caucasus Region. Natural Science. 2024;(4-1):91-97. (In Russ.). EDN: NDEVRN.
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-4-1-90-96>

14. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.* 4th ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences; 2022. 234 p.

15. Kazeev K.S., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems.* Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2016. 356 p. (In Russ.). EDN: XVOUSX.

16. Goulding K.W. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use Manag.* 2016;32:390-399. <https://doi.org/10.1111/sum.12270>

17. Robinson B.H., Yalamanchali R., Reiser R., Dickinson N.M. Lithium as an emerging environmental contaminant: Mobility in the soil-plant system. *Chem.* 2018;197:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.012>

18. Schofield R.K., Taylor A.W. The Measurement of Soil pH. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 1955;19:164-167. <https://doi.org/10.2136/sssaj1955.03615995001900020013x>

19. Avdonkin A. A. *Potential soil acidity, dependence on pH.* PhD thesis. Moscow, 2005. 121 p. (In Russ.). EDN: NNEARR.

20. Xiong R., He X., Gao N., Li Q., Qiu Z., Hou Y., Shen W. Soil pH amendment alters the abundance, diversity, and composition of microbial communities in two contrasting agricultural soils. *Microbiol Spectr.* 2024;12(8):e0416523. EDN: CRNWDM. <https://doi.org/10.1128/spectrum.04165-23>

Информация об авторах

Виктория Николаевна Сухомлинова – магистр кафедры экологии и природопользования Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Наталья Андреевна Евстегнеева – кандидат биологических наук, заведующая научной лабораторией, доцент кафедры экологии и природопользования Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Сергей Ильич Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Алена Николаевна Тимошенко – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Анна Степановна Русева – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и природопользования Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Information about the authors

Victoria N. Sukhomlinova – Master's Student, Department of Ecology and Nature Management, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Natalia A. Evstegneeva – Candidate of Science (Biology), Head of the Scientific Laboratory, Associate Professor of the Department of Ecology and Nature Management, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Sergey I. Kolesnikov – Doctor of Science (Agricultural), Professor, Head of the Department of Ecology and Nature Management, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Alyona N. Timoshenko – Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Anna S. Ruseva – Candidate of Science (Biology), Associate Professor of the Department of Ecology and Nature Management, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

Статья поступила в редакцию 09.07.2025; одобрена после рецензирования 02.08.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 09.07.2025; approved after reviewing 02.08.2025; accepted for publication 11.11.2025.

Научная статья

УДК 50, 579.2

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-157-163>

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЭУКАРИОТИЧЕСКИХ, ПРОКАРИОТИЧЕСКИХ КЛЕТКАХ И БАКТЕРИАЛЬНЫХ БИОПЛЕНКАХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: ПЕРСПЕКТИВЫ КИБЕРБИОНИКИ

Владимир Анатольевич Чистяков¹, Дмитрий Николаевич Савенков², Максим Константинович Суханов³, Анжелика Борисовна Брень⁴

^{1, 2, 3, 4} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

^{1, 4} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹vladimirchi@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2596-0855>

²savenkov-dstu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4875-8668>

³suhanov_mk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3363-6349>

⁴brenanzhelika@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7452-6203>

Аннотация. Нейроморфные вычисления базируются на имитации работы мозга. Это – популярное и перспективное направление кибернетики, однако его практическая реализация сталкивается с фундаментальными трудностями из-за чрезвычайной сложности «живых» нейронных сетей и недостаточной изученности принципов их организации. Целесообразно начать с моделирования более простых и хорошо изученных генетико-метаболических систем, характерных для клеточного уровня организации жизни. Рассмотрены принципы обработки информации в прокариотических и эукариотических системах, их потенциальное применение в гетерогенных процессорах, нейроморфных чипах и коллективных робототехнических системах. Для данного направления предложен термин «кибербионика». Обсуждаются перспективы развития направления, включая создание самовосстанавливающихся и эволюционно оптимизируемых систем.

Ключевые слова: кибербионика, биоинспирированные вычисления, нейроморфные системы, прокариоты, эукариоты, биопленки, аналоговые вычисления, адаптивные системы, кибернетические системы

Для цитирования: Чистяков В.А., Савенков Д.Н., Суханов М.К., Брень А.Б. Принципы организации вычислений в эукариотических, прокариотических клетках и бактериальных биопленках и их применение в кибернетических системах: перспективы кибербионики // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 157–163. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-157-163>

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-30006, <https://rscf.ru/project/23-76-30006>

Авторы признательны за высказанные при обсуждении работы ценные замечания доктору технических наук, профессору В.В. Курейчику, доктору технических наук, профессору Д.В. Рудому.

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

Original article

PRINCIPLES OF COMPUTATION ORGANISATION IN EUKARYOTIC AND PROCARYOTIC CELLS AND BACTERIAL BIOFILMS AND THEIR APPLICATION IN CYBERNETIC SYSTEMS: PROSPECTS FOR CYBERBIOLOGY

Vladimir A. Chistyakov¹, Dmitry N. Savenkov², Maksim K. Sukhanov³, Anzhelika B. Bren⁴

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

^{1, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

© Чистяков В.А., Савенков Д.Н., Суханов М.К., Брень А.Б., 2025

¹vladimirchi@sfnu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2596-0855>

²savenkov-dstu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4875-8668>

³suhanov_mk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3363-6349>

⁴brenanzhelika@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-7452-6203>

Abstract. *Neuromorphic computing, based on imitating the workings of the brain, is a popular and promising area of cybernetics, but its practical implementation faces fundamental difficulties due to the extreme complexity of 'living' neural networks and the insufficient study of the principles of their organisation. It seems more rational to start with modelling simpler and well-studied genetic-metabolic systems characteristic of the cellular level of life organisation. The review examines the principles of information processing in prokaryotic and eukaryotic systems, their potential application in heterogeneous processors, neuromorphic chips, and collective robotic systems. The term 'cyberbionics' is proposed for this field. The prospects for the development of this field are discussed, including the creation of self-repairing and evolutionarily optimised systems.*

Keywords: *cyberbionics, bio-inspired computing, neuromorphic systems, prokaryotes, eukaryotes, biofilms, analogue computing, adaptive systems, cybernetic systems*

For citation: Chistyakov V.A., Savenkov D.N., Sukhanov M.K., Bren A.B. Principles of Computation Organisation in Eukaryotic and Prokaryotic Cells and Bacterial Biofilms and Their Application in Cybernetic Systems: Prospects for Cyberbiology. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2025;(4):157-163. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-157-163>

Acknowledgments: *the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-76-30006, <https://rscf.ru/project/23-76-30006>*

The authors are grateful to Doctor of Technical Sciences, Professor V.V. Kureichik, Doctor of Technical Sciences, Professor D.V. Rudom for the valuable comments made during the discussion of the work.

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

Введение

Нейроморфные вычисления, основанные на имитации работы мозга, – популярное и перспективное направление кибернетики, однако их практическая реализация сталкивается с фундаментальными трудностями из-за чрезвычайной сложности «живых» нейронных сетей и недостаточной изученности принципов их организации [1, 2]. В связи с этим представляется более рациональным начать с моделирования более простых и хорошо изученных генетико-метаболических систем [3], характерных для клеточного уровня организации жизни. Прокариотические и эукариотические клетки демонстрируют высокоэффективные вычислительные механизмы, включая регуляторные генетические сети, способные к сложной логической обработке информации [4], метаболические пути, функционирующие как аналоговые вычислительные схемы [5, 6], системы внутриклеточной коммуникации, обеспечивающие надежную передачу сигналов.

Эти системы, в отличие от сетей, образуемых нейронами, имеют четко определенные молекулярные компоненты и хорошо описанные принципы взаимодействия, что делает их более доступными для инженерного воплощения [7]. При этом они сохраняют ключевые преимущества биологических систем – высокую энергоэффективность, параллельную обработку информации и способность к адаптации. Такой подход позволяет создать промежуточное звено между традиционными вычислениями и перспективными, но чрезмерно сложными нейроморфными системами, обеспечивая постепенное накопление опыта в области биоинспирированных архитектур [7, 8].

Мы предлагаем обозначить термином «кибербионика» научное направление на стыке бионики и кибернетики, изучающее принципы организации клеточных метаболических систем для создания инновационных вычислительных архитектур. В отличие от классической бионики, фокусирующейся на заимствовании структурных решений, к предметной области кибербионики могут быть отнесены исследования именно универсальных информационных и вычислительных аспектов живых систем [9]. Это направление особенно актуально в контексте развития энергоэффективных и адаптивных вычислительных систем.

Сравнительный анализ вычислительных систем

Эукариотические клетки: распределенная иерархическая архитектура. Эукариотическая клетка представляет собой сложную вычислительную систему с четким разделением функций между ядром (центральный процессор) и органеллами (специализированные сопроцессоры). Ядро отвечает за долгосрочное хранение информации и стратегическое управление. Митохондрии специализируются в основном на «энергетических вычислениях», имеющих смешанную аналого-цифровую природу [10, 11], а эндоплазматический ретикулум – на обработке «белковой информации», имеющей преимущественно цифровую основу [12]. Такая архитектура обеспечивает высокую надежность за счет избыточности (множество митохондрий и сетевая природа эндоплазматического ретикулума) и специализации. Ключевой особенностью является использование как цифровых (генетический код), так и аналоговых (концентрационные градиенты) принципов обработки информации.

Прокариотические клетки: компактные универсальные вычислители. Прокариоты демонстрируют принципиально иную организацию вычислений. Отсутствие ядерной мембраны и органелл приводит к необходимости совмещения всех функций, а также цифровых и аналоговых процессов в едином компактном пространстве. Вычислительный процесс организован по принципу конвейера, где транскрипция и трансляция могут происходить одновременно и управляться градиентами [13]. Это обеспечивает высокую скорость реакции на изменения среды, но ограничивает сложность возможных вычислений. Важная особенность – использование плазмид как съемных носителей информации, что можно рассматривать как биологический аналог plug-and-play-устройств.

Бактериальные биопленки: коллективные распределенные системы. Биопленки представляют высший уровень организации биологических вычислений, осуществляемых прокариотами. В таких сообществах отдельные бактерии функционируют как узлы распределенной сети, обмениваясь информацией через системы чувства кворума [14, 15]. Это позволяет решать задачи, недоступные отдельным клеткам, например координированное формирование трехмерных структур или коллективное принятие решений о вирулентности. Особенностью является сочетание централизованного (через внеклеточный матрикс) и децентрализованного управления [15].

Особенности вышеописанных биологических вычислительных систем кратко представлены в таблице.

Сравнительная таблица вычислительных характеристик
/ Comparison table of computing characteristics

Характеристика	Эукариоты	Прокариоты	Биопленки
Архитектура	Иерархическая	Монолитная	Сетевая
Параллелизм	Органелльный	Молекулярный	Клеточный
Надежность	Высокая	Средняя	Очень высокая
Адаптивность	Долгосрочная	Быстрая	Коллективная
Энергоэффективность	Оптимизированная	Высокая	Переменная

Возможное применение биологических принципов в технических кибернетических системах

Одним из ключевых аспектов клеточной организации является принцип распределенных вычислений с четким разделением функций. В клетке ядро выполняет роль центрального процессора, отвечающего за долгосрочное планирование и хранение информации, в то время как митохондрии функционируют как специализированные сопроцессоры, оптимизированные под специальные вычисления. Этот принцип может быть применен при разработке гетерогенных вычислительных систем, где разные модули специализируются на определенных типах задач. Например, в процессорах нового поколения можно выделить ядра общего назначения (аналоги ядерного генома) и специализированные блоки для энергоемких операций (аналоги митохондрий), что позволит значительно повысить энергоэффективность.

Особый интерес представляет клеточный механизм обработки сигналов, основанный на каскадах биохимических реакций. В отличие от традиционных цифровых систем с бинарной логикой клетка использует аналоговые принципы обработки информации, где важную роль играют концентрации молекул и временные параметры реакций [16]. Этот подход может быть реализован в

биоморфных чипах нового поколения, где информация кодируется не дискретными состояниями, а аналоговыми параметрами сигналов. Такие системы потенциально могут обеспечить более естественную обработку сенсорной информации и принятие решений в условиях неопределенности.

Важным принципом клеточных вычислений является их высокая степень параллелизма. Тысячи митохондрий одновременно участвуют в энергетических вычислениях [11], а рибосомы, организованные в сеть на основе эндоплазматического ретикула, параллельно синтезируют белки [17]. Этот принцип может быть использован при разработке массово-параллельных архитектур для обработки больших данных, где вместо традиционных вычислительных узлов используются простые, но многочисленные процессорные элементы, аналогичные митохондриям. Особенно перспективным представляется применение этого подхода в системах edge-вычислений, где требуется высокая производительность при ограниченных энергетических ресурсах.

Клеточные механизмы контроля качества и репарации предлагают интересные решения для повышения надежности вычислительных систем. В клетке существуют сложные системы проверки и исправления ошибок в ДНК, а также механизмы программируемой гибели поврежденных элементов (апоптоз) [16]. Аналогичные принципы могут быть реализованы в кибернетических системах через создание архитектур с автоматическим обнаружением и изоляцией неисправных модулей, а также их заменой на резервные элементы. Это особенно актуально для критически важных систем, работающих в экстремальных условиях.

Перспективно создание коллективных робототехнических систем, копирующих биопленки. Это может стать примером новых вычислительных парадигм, альтернативных фон-неймановской [18] архитектуре и устраняющих ее классические ограничения (неэффективность в параллельных задачах и энергозатратность). Динамическое перепрограммирование, когда клетки могут менять функции в зависимости от условий (например, переключаться между аэробным и анаэробным метаболизмом), реализовано в инжиниринге самовосстанавливающихся систем – если часть роботов выходит из строя, другие берут на себя их задачи [19].

Принцип эволюционной оптимизации, реализованный в клетках через механизмы мутаций и естественного отбора, может найти применение в самообучающихся кибернетических системах. Вместо традиционного программирования такие системы могли бы использовать механизмы случайных изменений с последующим отбором наиболее эффективных конфигураций. Этот подход особенно перспективен для создания адаптивных систем управления в условиях быстроменяющейся среды.

Отдельного внимания заслуживает клеточный подход к энергоменеджменту. Митохондрии демонстрируют удивительную способность точно подстраивать производство энергии под текущие потребности клетки. Этот принцип может быть использован при разработке систем энергообеспечения для автономных кибернетических устройств, где важно оптимальное распределение ограниченных энергетических ресурсов между различными подсистемами.

Реализация этих принципов требует разработки новых архитектурных решений на уровне как аппаратного обеспечения, так и программных платформ. На аппаратном уровне это выражается в создании гетерогенных процессоров с четким разделением функций между различными типами вычислительных блоков. На программном уровне потребуются разработка новых парадигм программирования, учитывающих распределенный характер вычислений и аналоговые принципы обработки информации.

Особую сложность представляет создание интерфейсов между различными типами вычислительных модулей, аналогичных системе коммуникации между ядром и митохондриями в клетке. Решение этой задачи потребует разработки новых протоколов обмена данными и специализированных шин передачи информации.

Перспективным направлением представляется создание гибридных систем, сочетающих традиционные цифровые вычисления с биоинспирированными аналоговыми методами обработки информации. Такие системы могли бы использовать цифровые компоненты для точных вычислений и хранения данных, аналоговые – для обработки сенсорной информации и принятия решений в реальном времени.

На основании проведенного анализа выделим следующие перспективные направления технической реализации кибербионических принципов:

1. Гибридные процессоры на основе эукариотического принципа. Архитектура современных процессоров может быть усовершенствована путем заимствования принципа специализации из эукариотических клеток. Предлагается создание гетерогенных чипов, где основные ядра (аналоги ядра

клетки) отвечают за общее управление, специализированные сопроцессоры (аналоги митохондрий) оптимизированы под конкретные задачи, а система внутричиповых коммуникаций (аналог цитоплазматического транспорта) обеспечивает координацию [20].

2. Адаптивные системы на основе прокариотических принципов. Для устройств интернета вещей особенно актуальны принципы прокариотических вычислений, включающие минималистичные автономные модули, быстрое переключение между задачами, горизонтальный обмен информацией, «плазмидный» принцип обновления ПО [21].

3. Коллективные робототехнические системы по образу биопленок. Бактериальные биопленки предлагают новые подходы к организации: роевой интеллект, децентрализованное управление, адаптивное перераспределение функций, коллективное принятие решений [19, 22].

Заключение

Таким образом, развитие кибербионики открывает путь к созданию принципиально новых вычислительных систем, сочетающих лучшие черты биологических и технических решений. Особенно перспективными направлениями являются энергоавтономные сенсорные сети, самовосстанавливающиеся вычислительные системы, адаптивные биоморфные архитектуры, коллективные робототехнические системы [7, 8, 19, 22, 23].

Реализация этих принципов открывает возможности для создания кибернетических систем нового поколения, отличающихся высокой энергоэффективностью, отказоустойчивостью и адаптивностью. Хотя прямое копирование биологических механизмов не всегда возможно, их творческая адаптация позволит преодолеть ограничения традиционных вычислений. Развитие аналоговых биоморфных систем, энергоавтономных устройств и коллективного интеллекта может привести к прорыву в робототехнике, медицине и интернете вещей, однако потребуются междисциплинарные исследования на стыке биологии, кибернетики и микроэлектроники.

Список источников

1. Mead C. Neuromorphic electronic systems // Proceedings of the IEEE. 1990. Vol. 78, № 10. P. 1629–1636. <https://doi.org/10.1109/5.58356>
2. Jang H., Lee J., Beak C.J., Biswas S., Lee S.H., Kim H. Flexible Neuromorphic Electronics for Wearable Near-Sensor and In-Sensor Computing Systems // Adv Mater. 2025. Vol. 37, № 9. Art. 2416073. PMID: 39828517. EDN: YFARJN. <https://doi.org/10.1002/adma.202416073>
3. Benenson Y. Biomolecular computing systems: principles, progress and potential // Nat. Rev. Genet. 2012. Vol. 13, № 7. P. 455–468. PMID: 22688678. <https://doi.org/10.1038/nrg3197>
4. Nielsen A.A., Der B.S., Shin J., Vaidyanathan P., Paralanov V., Strychalski E.A., Ross D., Densmore D., Voigt C.A. Genetic circuit design automation // Science. 2016. Vol. 352, № 6281. Art. aac7341. PMID: 27034378. <https://doi.org/10.1126/science.aac7341>
5. Sarpeshkar R. Analog synthetic biology // Philos. Trans. a Math. Phys. Eng. Sci. 2014. Vol. 372, № 2012. Art. 20130110. PMID: PMC3928905. PMID: 24567476. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0110>
6. Daniel R., Rubens J.R., Sarpeshkar R., Lu T.K. Synthetic analog computation in living cells // Nature. 2013. Vol. 497, № 7451. P. 619–623. PMID: 23676681. <https://doi.org/10.1038/nature12148>
7. Del Ser J., Osaba E., Molina D., Yang X.-S., Salcedo-Sanz S., Camacho D., Das S., Suganthan P., Coello C., Herrera F. Bio-inspired computation: Where we stand and what's next // Swarm and Evolutionary Computation. 2019. Vol. 48. P. 220–250. EDN: KHUCBV. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.04.008>
8. Zhang W., Ma S., Ji X., Liu X., Cong Y., Shi L. The development of general-purpose brain-inspired computing // Nat. Electron. 2024. Vol. 7, № 11. P. 954–965. EDN: OFYOTO. <https://doi.org/10.1038/s41928-024-01277-y>
9. Kurian P. Computational capacity of life in relation to the universe // Science Advances. 2025. Vol. 11, iss 13. EDN: XNCPST. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adt4623>
10. Varghese S., Elemans J.A.A.W., Rowan A.E., Nolte R.J.M. Molecular computing: paths to chemical Turing machines // Chem. Sci. 2015. Vol. 6, № 11. P. 6050–6058. PMID: 28717447. PMID: PMC5504628. <https://doi.org/10.1039/c5sc02317c>
11. Uzhachenko R., Shanker A., Dupont G. Computational properties of mitochondria in T cell activation and fate // Open Biol. 2016. Vol. 6, № 11. Art. 160192. PMID: 27852805. PMID: PMC5133440. EDN: YFERES. <https://doi.org/10.1098/rsob.160192>
12. Caramelo J.J., Parodi A.J. A sweet code for glycoprotein folding // FEBS Lett. 2015. Vol. 589. P. 3379–3387. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2015.07.021>

13. Milo R., Phillips R. Cell Biology by the Numbers. N.Y.: Garland Science, 2015. 400 p. <https://doi.org/10.1201/9780429258770>
14. Nadell C.D., Xavier J.B., Levin S.A., Foster K.R. The evolution of quorum sensing in bacterial biofilms // PLoS Biol. 2008. Vol. 6, № 1. Art. e14. PMID: 18232735. PMCID: PMC2214811. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060014>
15. Shapiro J.A. A very brief note on why bacterial evolution has physiology // J. Physiol. 2024. Vol. 602, № 11. P. 2395–2399. EDN: DILJZO. PMID: 37641409. <https://doi.org/10.1113/JP284409>
16. Мухеев П.К., Андреева Е.Н., Григорян О.П., Шереметьева Е.В., Абсатарова Ю.С., Одарченко А.С., Оплетаяева О.Н. Молекулярные и клеточные механизмы старения: современные представления (обзор литературы) // Проблемы эндокринологии. 2023. Т. 69, № 5. С. 45–54. EDN: GOBPLP. PMID: 37968951. PMCID: PMC10680502. <https://doi.org/10.14341/probl13278>
17. Bray D. Protein molecules as computational elements in living cells // Nature. 1995. Vol. 376. P. 307–312. <https://doi.org/10.1038/376307a0>
18. Godfrey M. First Draft Report on the EDVAC by John von Neumann // IEEE Annals of the History of Computing. 1993. Vol. 15. P. 27–43.
19. Cambier N., Miletich R., Fremont V., Dorigo M., Ferrante E., Trianni V. Language Evolution in Swarm Robotics: A Perspective // Frontiers in Robotics and AI. 2020. Vol. 7. Art. 12. EDN: CBXIYY. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00012>
20. Merolla P.A., Arthur J.V., Alvarez-Icaza R., Cassidy A.S., Sawada J., Akopyan F., Jackson B.L., Imam N., Guo C., Nakamura Y., Brezzo B., Vo I., Esser S.K., Appuswamy R., Taba B., Amir A., Flickner M.D., Risk W.P., Manohar R., Modha D.S. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface // Science. 2014. Vol. 345, № 6197. P. 668–673. PMID: 25104385. <https://doi.org/10.1126/science.1254642>
21. Sarpeshkar R. Ultra Low Power Bioelectronics: Fundamentals, Biomedical Applications, and Bio-Inspired Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 890 p. EDN: YBVUYU. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841446>
22. Hamann H. Swarm Robotics: A Formal Approach. Springer, 2018. 210 p. EDN: MUOEZC. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74528-2>
23. Yao X. From Evolutionary Computation to Natural Computation // Adaptive Computing in Design and Manufacture V. London: Springer, 2002. P. 41–50. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-345-9_4

References

1. Mead C. Neuromorphic electronic systems. *Proceedings of the IEEE*. 1990;78(10):1629-1636. <https://doi.org/10.1109/5.58356>
2. Jang H., Lee J., Beak C.J., Biswas S., Lee S.H., Kim H. Flexible Neuromorphic Electronics for Wearable Near-Sensor and In-Sensor Computing Systems. *Adv. Mater.* 2025;37(9):2416073. PMID: 39828517. EDN: YFARJN. <https://doi.org/10.1002/adma.202416073>
3. Benenson Y. Biomolecular computing systems: principles, progress and potential. *Nat. Rev. Genet.* 2012;13(7):455-468. PMID: 22688678. <https://doi.org/10.1038/nrg3197>
4. Nielsen A.A., Der B.S., Shin J., Vaidyanathan P., Paralanov V., Strychalski E.A., Ross D., Densmore D., Voigt C.A. Genetic circuit design automation. *Science*. 2016;352(6281):aac7341. PMID: 27034378. <https://doi.org/10.1126/science.aac7341>
5. Sarpeshkar R. Analog synthetic biology. *Philos. Trans. a Math. Phys. Eng. Sci.* 2014;372(2012):20130110. PMCID: PMC3928905. PMID: 24567476. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0110>
6. Daniel R., Rubens J.R., Sarpeshkar R., Lu T.K. Synthetic analog computation in living cells. *Nature*. 2013;497(7451):619-623. PMID: 23676681. <https://doi.org/10.1038/nature12148>
7. Del Ser J., Osaba E., Molina D., Yang X.-S., Salcedo-Sanz S., Camacho D., Das S., Suganthan P., Coello C., Herrera F. Bio-inspired computation: Where we stand and what's next. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019;48:220-250. EDN: KHUCBV. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.04.008>
8. Zhang W., Ma S., Ji X., Liu X., Cong Y., Shi L. The development of general-purpose brain-inspired computing. *Nat. Electron.* 2024;7(11):954-965. EDN: OFYOTO. <https://doi.org/10.1038/s41928-024-01277-y>
9. Kurian P. Computational capacity of life in relation to the universe. *Science Advances*. 2025;11(13). EDN: XNCPST. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adt4623>
10. Varghese S., Elemans J.A.A.W., Rowan A.E., Nolte R.J.M. Molecular computing: paths to chemical Turing machines. *Chem. Sci.* 2015;6(11):6050-6058. PMID: 28717447. PMCID: PMC5504628. <https://doi.org/10.1039/c5sc02317c>
11. Uzhachenko R., Shanker A., Dupont G. Computational properties of mitochondria in T cell activation and fate. *Open Biol.* 2016;6(11):160192. PMID: 27852805. PMCID: PMC5133440. EDN: YFERES. <https://doi.org/10.1098/rsob.160192>

12. Caramelo J.J., Parodi A.J. A sweet code for glycoprotein folding. *FEBS Lett.* 2015;589:3379-3387. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2015.07.021>
13. Milo R., Phillips R. *Cell biology by the numbers*. N.Y.: Garland Science; 2015. 400 p. <https://doi.org/10.1201/9780429258770>
14. Nadell C.D., Xavier J.B., Levin S.A., Foster K.R. The evolution of quorum sensing in bacterial biofilms. *PLoS Biol.* 2008;6(1):e14. PMID: 18232735. PMCID: PMC2214811. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060014>
15. Shapiro J.A. A very brief note on why bacterial evolution has physiology. *J. Physiol.* 2024;602(11):2395-2399. EDN: DILJZO. PMID: 37641409. <https://doi.org/10.1113/JP284409>
16. Mikheev R.K., Andreeva E.N., Grigoryan O.R., Sheremetyeva E.V., Absatarova Yu.S., Odarchchenko A.S., Opletayeva O.N. Molecular and cellular mechanisms of aging: current concepts (literature review). *Problems of Endocrinology.* 2023;69(5):45-54. (In Russ.). EDN: GOBPLP. PMID: 37968951. PMCID: PMC10680502. <https://doi.org/10.14341/probl13278>
17. Bray D. Protein molecules as computational elements in living cells. *Nature.* 1995;376:307-312. <https://doi.org/10.1038/376307a0>
18. Godfrey M. First Draft Report on the EDVAC by John von Neumann. *IEEE Annals of the History of Computing.* 1993;15:27-43.
19. Cambier N., Miletitch R., Fremont V., Dorigo M., Ferrante E., Trianni V. Language Evolution in Swarm Robotics: A Perspective. *Frontiers in Robotics and AI.* 2020;7:12. EDN: CBXIYY. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00012>
20. Merolla P.A., Arthur J.V., Alvarez-Icaza R., Cassidy A.S., Sawada J., Akopyan F., Jackson B.L., Imam N., Guo C., Nakamura Y., Brezzo B., Vo I., Esser S.K., Appuswamy R., Taba B., Amir A., Flickner M.D., Risk W.P., Manohar R., Modha D.S. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface. *Science.* 2014; 345(6197):668-673. PMID: 25104385. <https://doi.org/10.1126/science.1254642>
21. Sarpeshkar R. *Ultra low power bioelectronics: fundamentals, biomedical applications, and bio-inspired systems*. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. 890 p. EDN: YBVUYU. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841446>
22. Hamann H. *Swarm robotics: a formal approach*. Springer; 2018. 210 p. EDN: MUOEZC. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74528-2>
23. Yao X. From evolutionary computation to natural computation. *Adaptive Computing in Design and Manufacture V*. London: Springer; 2002:41-50. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-345-9_4

Информация об авторах

В.А. Чистяков – доктор биологических наук, главный научный сотрудник Центра агробιοтехнологии ДГТУ; главный научный сотрудник лаборатории здоровья почв Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Д.Н. Савенков – кандидат технических наук, доцент кафедры техники и технологии пищевых производств, заведующий научно-исследовательской лабораторией РСМ-STAR ДГТУ.

Д.К. Суханов – магистрант, кафедра приборостроения и биомедицинской инженерии, инженер научно-исследовательской лаборатории РСМ-STAR ДГТУ.

А.Б. Брень – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Центра агробιοтехнологии ДГТУ; старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экспериментального мутагенеза Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

Information about the authors

V.A. Chistyakov – Doctor of Science (Biology), Chief Researcher of the Center for Agrobiotechnology, DSTU; Chief Researcher, Soil Health Laboratory, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

D.N. Savenkov – Candidate of Science (Technical), Associate Professor of the Department of Food Production Engineering and Technology, Head of the PCM-STAR Research Laboratory, DSTU.

D.K. Sukhanov – Master's Student, Department of Instrumentation and Biomedical Engineering, Engineer of the PCM-STAR Research Laboratory, DSTU.

A.B. Bren – Candidate of Science (Biology), Leading Researcher of the Center for Agrobiotechnology, DSTU; Senior Researcher of the Research Laboratory of Experimental Mutagenesis, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

*Статья поступила в редакцию 09.07.2025; одобрена после рецензирования 02.08.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 09.07.2025; approved after reviewing 02.08.2025; accepted for publication 11.11.2025.*

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Материалы конференции

doi: 10.18522/1026-2237-2025-4-164-167

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ВОДОСБОР – РЕКА – УСТЬЕ: ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИИ ПОЧВ, РУСЛОВЫХ И УСТЬЕВЫХ ПРОЦЕССОВ» (г. Ростов-на-Дону, 15–18 сентября 2025 года)

Татьяна Михайловна Минкина¹, Ольга Сергеевна Решетняк²

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

Для цитирования: Минкина Т.М., Решетняк О.С. Международная научная конференция «Водосбор – река – устье: исследования эрозии почв, русловых и устьевых процессов» (г. Ростов-на-Дону, 15–18 сентября 2025 г.) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 164–167. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-164-167>

Conference materials

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “CATCHMENT-RIVER-ESTUARY: STUDIES OF SOIL EROSION, CHANNEL, AND ESTUARY PROCESSES” (Rostov-on-Don, September 15-18, 2025)

Tatyana M. Minkina¹, Olga S. Reshetnyak²

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

For citation: Minkina T.M., Reshetnyak O.S. International Scientific Conference “Catchment-River-Estuary: Studies of Soil Erosion, Channel, and Estuary Processes” (Rostov-on-Don, September 15-18, 2025). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2025;(4):164-167. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-164-167>

Конференция проводилась совместно с юбилейным, XL совещанием межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ. Её организаторы – Межвузовский научно-координационный совет по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ, Южный федеральный университет (ЮФУ), Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН) и Ростовское отделение Общества почвоведов им. В.В. Докучаева.

Цель конференции – обмен информацией между учеными разных организаций, университетов и стран о результатах исследований, установление научных связей, разработка совместных программ и проектов, решение экологических проблем на водосборах рек в целом, особенно в уникальных устьевых экосистемах. В работе конференции приняли участие более 150 чел.

Ученые из России, Белоруссии, Казахстана, Индии, Узбекистана представили широкий спектр докладов по актуальным вопросам эрозии и загрязнения почв, поверхностных вод, технологий их очистки и восстановления.

В первый день конференции проведены научная выставка-экскурсия «От исследований до инноваций» в центре «Биоинженерия почв» на базе Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ и совещание президиума Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ.

Второй и третий день конференции – пленарные и секционные доклады на площадках ЮФУ и ЮНЦ РАН. На секционных заседаниях было представлено более 100 устных и 28 стендовых докладов, которые войдут в сборник материалов конференции. В течение заседаний конференции заслушаны доклады по широкому кругу вопросов, ориентированных на комплексное изучение эрозионных, русловых и устьевых процессов.

С приветственными словами к участникам конференции обратились представители ЮФУ – ректор И.К. Шевченко, президент М.А. Боровская, проректор по стратегическому развитию и исследовательской деятельности Е.Л. Муханов, проректор по международной и проектной деятельности М.Г. Бондарев, директор Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского К.Ш. Казеев, заместитель министра по природным ресурсам и экологии Ростовской области А.В. Кушнарева и председатель Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ С.Р. Чалов. Выступающие отметили, что экологические проблемы на водосборах рек и в их устьевых экосистемах имеют межрегиональный и трансграничный характер, поэтому необходим комплексный подход к их решению. В этом контексте исследования эрозионных и русловых процессов, формирование моделей устьевых экосистем становятся особенно актуальными в современных условиях экологических вызовов и угроз. Также было отмечено, что Межвузовский научно-координационный совет по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ, к деятельности которого присоединились ученые ЮФУ и ЮНЦ РАН, может стать интегрирующей платформой, на базе которой ученые могут обсуждать проблемы экологической безопасности на водосборах рек.

В рамках пленарных заседаний выступили ведущие ученые Юга России с докладами, посвященными стратегическому проекту «Биоинженерия почв», истории развития и становления кафедры почвоведения и оценке земельных ресурсов (д.б.н., профессор Т.М. Минкина и д.б.н., профессор О.С. Безуглова, ЮФУ), управлению эрозионно-гидрологическими процессами (д.с.-х.н. А.Т. Барабанов, ФНЦ агроэкологии РАН), влиянию различных факторов на баланс наносов в дельте Дона (д.г.н. С.В. Бердников, директор ЮНЦ РАН), особенностям численной гидродинамической модели Нижнего Дона (д.т.н. В.В. Беликов, ИВП РАН), исследованиям стока наносов русловых и устьевых систем на основе спутниковых технологий (д.г.н. С.Р. Чалов, МГУ).

На секции «Эрозия почв, методы предупреждения и восстановления» заслушано 14 докладов. Докладчиками широко представлена география нашей страны, показаны эрозионные и русловые процессы в бассейнах рек Урал, Волга, Вятка, Дон. Интерес вызвали доклады, в которых показаны преимущества построения моделей для оценки стока с пахотных полей (А.М. Зейлигер), исследования физических свойств почв различной степени смываемости на основе материалов из базы данных (В.Э. Болдырева), анализ факторов, влияющих на твердый и жидкий сток с агрочерноземов склоновых земель (Э.А. Гаевая). Ряд очень интересных докладов был посвящен проблемам использования ГИС-технологий для оценки и динамики эрозионных процессов, их картографирования (И.И. Григорьев, Ж.А. Буряк, И.И. Рысин). Много вопросов вызвал доклад об использовании нового метода радарной интерферометрии в целях картографирования почвенной эрозии (А.М. Гафуров). На необходимости широкомасштабного проведения противоэрозионных мероприятий, минимизации пастбищной нагрузки на природные комплексы остановился в своем докладе А.М. Гареев. О назревшей разработке методических подходов к районированию крупных природных объектов по степени эрозионной опасности был доклад А.П. Жидкина.

Актуальным вопросам биотехнологии и биоинженеринга почв посвящена группа докладов иностранных специалистов и аспирантов ЮФУ (руководитель д.б.н., проф. Т.М. Минкина) на секции «Загрязнение почв и поверхностных вод, технологии их очистки и восстановления». В её работе приняли активное участие порядка 50 чел., включая докладчиков и слушателей. Было заявлено 22 устных доклада, из них один в режиме онлайн, заслушано 17. 7 иностранных граждан из Узбекистана и Индии представили результаты своих исследований на английском языке.

В докладах всесторонне освещены проблемы загрязнения почв тяжелыми металлами и ПАУ, подчеркнуто их влияние на экосистемы. Рассмотрены вопросы состояния речных бассейнов рек России и ближнего зарубежья, рационального управления водными ресурсами, восстановления

почв и управления их качеством с использованием высокофункциональных материалов. Особое внимание привлекли доклады в области ризосферной биоинженерии и наноремедиации: «Mycoremediation of Heavy Metals Contaminated Soil Using White-Rot Fungi» М Насира и «Rhizospheric nano-remediation salvages arsenic genotoxicity: Zinc-oxide nanoparticles articulate better oxidative stress management, reduce arsenic uptake, and increase yield in *Pisum sativum* (L.)» Б. Сварнендра.

Интерес вызвал доклад Р.В. Дайяла, ведущего научного сотрудника и руководителя Международной лаборатории нанобиотехнологий, об использовании наноматериалов и нанобиоуглей для целенаправленного изменения микробного сообщества в ризосфере.

М.Г. Маммед, ведущий научный сотрудник, представил доклад о результатах комплексного моделирования управления водными ресурсами в крупном африканском речном бассейне для определения наиболее эффективных стратегий распределения воды с учетом климатических изменений.

Б. Сварнендра представил исследование в области ризосферной наноремедиации для снижения генотоксичности мышьяка и показал механизм положительного действия наночастиц оксида цинка на показатели урожайности и окислительный стресс гороха (*Pisum sativum*).

И. Ахмад, заведующий научной лабораторией «Экологический мониторинг почв», осветил вопросы применения агротехнологий в условиях изменения климата. В докладе были представлены данные о корреляции между дозами азотных удобрений и эмиссией закиси азота и метана из почвы.

Отдельная часть докладов касалась вопросов загрязнения речных вод и изменчивости ионного стока рек с водосборов. По мнению авторов, широкий спектр загрязняющих веществ, поступающий со сточными водами и с диффузным стоком с водосборной территории, приводит к значительному ухудшению качества воды (В.А. Потапенко, М.В. Кумани – р. Сейм ниже г. Курска, К.А. Шумилина, О.С. Решетняк, М.В. Альпина – бассейны рек азиатской части РФ).

Результаты оценки изменчивости ионного стока рек европейской части России прозвучали в докладах Р.С. Комарова и А.А. Коваленко под руководством д.г.н. О.С. Решетняк (исследования выполнялись в рамках гранта РНФ № 24-27-00366). На примере водосборов рек Северная Двина и Кубань показано, что изменчивость модуля ионного стока рек может служить индикатором эрозионных процессов, характеризовать химическую денудацию на водосборах рек, протекающую под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов.

Региональные агроэкологические проблемы рассматривались на секции «Агротехнологии сохранения и восстановления плодородия почв». Доклад Л.Ю. Гончаровой о В.В. Акимцеве подчеркнул важность сохранения научного наследия и преемственности в развитии университетской школы почвоведения. Отдельная часть докладов была посвящена использованию искусственного интеллекта и методам машинного обучения в почвоведении. Теоретические основы формирования цифрового двойника почв Юга России рассмотрены Ю.А. Литвиновым. Р.Х. Темботов изложил методические подходы к созданию интерактивных картографических моделей почвенных показателей. В.Н. Гудко представил результаты моделирования валовых сборов озимой пшеницы по различным сценариям до 2035 г. Результаты мониторинговых исследований гумусового состояния пахотных чернозёмов равнинных территорий Центрального Кавказа (2012–2022 гг.) прозвучали в докладе О.Н. Горобцовой. Рассматривались вопросы трансформации фосфора в системе почва – растение при внедрении технологии no-till (О.А. Бирюкова с соавт., В.А. Ерин с соавт.).

Особый интерес вызвали доклады по разработке и использованию инновационных материалов (мелиоранты, наноплатформы) для устойчивого землепользования. Р.Б. Табакаев с соавторами предложил эффективный способ получения углеродного почвенного мелиоранта, применение которого позволит сохранить плодородие почв. Более высокотехнологичное решение, сочетающее биочар и контролируруемую доставку ауксинов, представлено в докладе В. А. Полякова с соавторами.

На конференции были представлены и заслушаны 28 стендовых докладов, авторы которых – студенты, российские и зарубежные аспиранты, научные сотрудники Академии биологии и медицины. Темы стендовых докладов посвящены актуальным проблемам почвоведения (влияние технологии no-till на плодородие и свойства чернозёмов, мелиорация и ремедиация загрязнённых

тяжелыми металлами почв и почв углеотвалов с использованием биочара и нанокompозитов, мониторинг и создание геоинформационных моделей эрозионных процессов и т.д.).

Третий день конференции собрал ведущих специалистов и ученых в области русловых и устьевых процессов в ЮНЦ РАН. Детально рассматривались вопросы руслоформирования рек (В.М. Католиков), трансформации русел рек в условиях глобальных климатических изменений (А.В. Чернов), эрозионно-русловые деформации (С.Е. Коркин) и др.

Отдельная группа докладов касалась исследований в устьевой области р. Дон. В докладе О.В. Горелиц с соавторами (ГОИН) рассмотрены современные технологии цифровизации в комплексных исследованиях устьевых областей рек. Для устьевых областей Дона и Волги разработана гидрологическая модель. Ученые из МГУ, ГГИ и ЮНЦ РАН представили результаты изучения водного режима придельтового участка реки Дон, обратных течений в дельте, гидродинамики дельты Дона в условиях нагона, способы численного моделирования уровня воды в дельте Дона и ряд других вопросов.

Участники конференции в своих выступлениях показали высокий профессиональный уровень, в докладах отразили важность исследований эрозионных и русловых процессов, последствий нерационального природопользования в уникальных устьевых экосистемах, особенно в условиях климатических изменений, а также выразили искреннюю благодарность всем организаторам конференции за прекрасную подготовку и проведение данного мероприятия.

Информация об авторах

Т.М. Минкина – доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ.

О.С. Решетняк – доктор географических наук, профессор кафедры геоэкологии и прикладной геохимии, Института наук о Земле ЮФУ.

Information about the authors

T.M. Minkina – Doctor of Science (Biology), Professor, Head of the Department of Soil Science and Land Resource Assessment, Ivanovsky Academy of Biology and Medicine, SFedU.

O.S. Reshetnyak – Doctor of Science (Geography), Professor of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences, SFedU.

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-168-170>

30 ЛЕТ НА СЛУЖБЕ ОХРАНЫ ПРИРОДЫ (биосферному заповеднику «Ростовский» – 30 лет)

Виктор Аркадьевич Миноранский^{1✉}, Юлия Валерьевна Тимофеевко²

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

^{1, 2} Ассоциация «Живая природа степи», Ростов-на-Дону, Россия

¹ priroda.rostov@yandex.ru[✉]

² ymal@sfedu.ru

Для цитирования: Миноранский В.А., Тимофеевко Ю.В. 30 лет на службе охраны природы (Биосферному заповеднику «Ростовский» – 30 лет) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2025. № 4. С. 168–170. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-168-170>

30 YEARS OF SERVICE TO NATURE CONSERVATION (Rostov Biosphere Reserve - 30th anniversary)

Victor A. Minoransky^{1✉}, Yulia V. Timofeenko²

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

^{1, 2} Association “Wild Nature of the Steppe”, Rostov-on-Don, Russia

¹ priroda.rostov@yandex.ru[✉]

² ymal@sfedu.ru

For citation: Minoransky V.A., Timofeenko Y.V. 30 Years of Service to Nature Conservation (Rostov Biosphere Reserve - 30th Anniversary). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2025;(4):168-170. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-168-170>

Удачное географическое положение, благоприятный климат, хорошие пастбища для скота, лучшие почвы для сельскохозяйственных культур, богатейшие рыбные ресурсы, большие запасы угля и многое другое исторически привлекало в донские степи различные народы. Жившие на Дону казаки уже в XIX в. – начале XX в. уделяли внимание сохранению этих ресурсов (указ Сената России о создании в дельте Дона и Таганрогском заливе в 1819 г. рыбного заповедника, меры по сохранению рыбных ресурсов, облесению степей и т.д.). Однако негативное влияние деятельности людей на природу проявлялось. К началу XX в. здесь исчезли тетерев, фазан, кабан, лось, ряд других животных. Революция, войны, интенсивное развитие сельского хозяйства и промышленности в первой половине XX в. оказали воздействие на природу Дона. Негативно повлияла на живую природу социально-экономическая перестройка общества с 90-х гг. XX в. Произошло сильное загрязнение водоемов, снизились рыбные ресурсы в Азовском море, р. Дон и иных водоемах, сократились площади древесной растительности.

Одним из наиболее эффективных направлений в охране природы являются заповедники. На Дону вопрос о них поднимался специалистами еще в первой половине XX в., но не решался из-за большой ценности земли в Ростовской области (РО), необходимости её изъятия из хозяйственного оборота. В 90-е гг. XX в. специалисты РГУ обосновали создание степного заповедника в районе оз. Маныч-Гудило и подготовили проект. Он был поддержан председателем СКНЦ ВШ Ю.А. Ждановым, В.Н. Агеевым из Госкомэкологии и губернатором РО В.Ф. Чубом. Правительство РФ дало согласие на его создание.

Но в итоге границы заповедника отличались от первоначального варианта. Под заповедник отвели деградированные, антропогенно-опустыненные четыре участка (9464,8 га) в 5–25 км друг от друга на правом берегу оз. Маныч-Гудило (Орловский и Ремонтненский районы РО) на основании Распоряжения Правительства РФ № 1292 от 27.12.1995.

Возглавил его уроженец этих мест, хорошо знающий природу, А.В. Чекин. В первые годы были приобретены административное здание, кордоны и транспорт, собран коллектив. В 1996 г. к научной работе привлекли работавших ранее на этой территории зоологов РГУ.

В новых социально-экономических условиях заповедник испытывал большие финансовые, материальные, кадровые и иные трудности. Инициативная группа из представителей РГУ (с 2006 г. – ЮФУ), ЮНЦ РАН, государственных структур и бизнеса предложила создать Ассоциацию «Живая природа степи» (далее – Ассоциация). Она объединила государственные, коммерческие и общественные структуры по решению экологических проблем и координации их деятельности в сохранении природных ресурсов. Модельной территорией Ассоциации сделали заповедник «Ростовский» и его охранную зону (Маньчский природный комплекс (МПК)). Работая в плотном контакте с заповедником, она оказывала ему организационную, материальную, научную помощь. Были заключены договоры по природоохранной деятельности с научными структурами (РГУ/ЮФУ, МГУ, КалмГУ, ИПЭЭ РАН, ЮНЦ РАН, Ин-т степи УрО РАН и т.д.), Минприроды РО, заповедниками («Аскания-Нова», «Черные земли», др.). В п. Орловском Ассоциация построила гостиницу, в охранной зоне заповедника – полевой стационар с прудами, загонами для животных, в х. Кундрюченском – Центр редких животных европейских степей. С 2008 г. начал работать полевой научно-экспедиционный стационар «Маньч» ЮНЦ РАН. Второй директор заповедника (с 2005 г.) – местная жительница, канд. с/х наук Л.В. Клец – активно включилась в работу.

Объединение усилий многих структур дало возможность заповеднику за 10–15 лет наладить успешную природоохранную, научную и учебную деятельность, сформировать на месте антропогенных пустынь естественные экосистемы с их биоразнообразием, обогатить комплексы ресурсных и редких видов. Здесь сохранились пеликаны, дрофа, стрепет, многие редкие виды, численность их возросла. Начали размножаться черноголовый хохотун, чеграва, курганник, орлан-белохвост. Находясь на пути миграции птиц, МПК стал местом их концентрации в период перелетов.

Специалисты заповедника, Ассоциации, ЮФУ, МГУ, ЮНЦ РАН, ИПЭЭ РАН, других научных и учебных центров РО и РФ в МПК изучают степные и водные экосистемы, ведут их мониторинг, используют имеющиеся и разрабатывают новые приемы и меры по сохранению биоразнообразия. В стационаре Ассоциации (2000 га) создали кормовые поля, загоны, свободный выпас животным (около 90 % территории), пруды. Разработали биотехнологию разведения животных (лошади Пржевальского, канны, страусы, кряквы) в искусственных условиях. Здесь содержится самое крупное в питомниках РФ стадо сайгака (около 100 ос.). С 2002 г. регулярно издаются труды заповедника (вышло 7 выпусков), где публикуются работы сотрудников и специалистов из других структур РФ. Собранный в МПК материал опубликован в научных сводках, широко освещается в журналах, на конференциях. Заповедник вместе с Минприроды РО и Ассоциацией провел 8 международных научно-практических природоохранных конференций, включая форумы «У нас одна Земля. В гармонии с природой» (2015 г., Красная Поляна – Сочи) и «Степная Евразия – устойчивое развитие» (2022 г., Ростов н/Д.). МПК стал ведущим на юге полевым центром для студентов, ученых и специалистов. На собранном здесь материале выполнено большое количество курсовых, дипломных и магистерских работ, защищены кандидатские и докторские диссертации, выпущены сводки, монографии, альбомы по природе и её сохранению.

К важным направлениям деятельности заповедника относятся экопросвещение и экотуризм. Самостоятельно или вместе с Ассоциацией, Минприроды РО, другими структурами он регулярно проводит международные, всероссийские и региональные природоохранные акции со школьниками, студентами, журналистами и населением. Периодически организовывались экологические туры руководителей отечественных и зарубежных туристических фирм, работников СМИ с участием журналистов России, Чехии, Германии, Австрии, Англии, США, Нидерландов, Швейцарии, Бельгии. С 2005 г. сотрудники заповедника самостоятельно, совместно с Ассоциацией и ЮНЦ РАН ежегодно не менее 30 раз выступают на телевизионных каналах, радио; 50–60 раз – на страницах газет, журналов; постоянно – в социальных сетях. В них освещаются вопросы богатства природных ресурсов РО, необходимости их сохранения и разумного использования. Неоднократно МПК посещали Н.Н. Дроздов, Ю.Б. Лапин, М.А. Ширвиндт, М. Симоньян, В. Богма, другие известные тележурналисты. Снятые в МПК видеофильмы «Ассоциация „Живая

природа степи“), «Моя малая родина», «Рожденные свободными», «Времена года», «Степь» демонстрируются на каналах ТВ, в вузах, школах, на конференциях.

Ежегодно сотрудники участвуют в работе проводимых в заповеднике и за его пределами экологических лагерей, слётов юных экологов Дона, детских конференциях «Живой природе – живое участие» и других мероприятиях. Традиционными стали акции «Сохраним первоцветы», «Зелёная ленточка», «Марш парков», «Осенний учёт птиц», «Покормите птиц зимой», «День заповедников и национальных парков России», «Заповедные острова».

Ежегодным стал фестиваль экотуризма «Воспетая степь». В 2013 г. Ассоциация на базе центра провела первый фестиваль. В дальнейшем к его организации присоединились заповедник, ЮНЦ РАН, администрации РО и районов, другие структуры. В 2017 г. (Год ООПТ и экологии) он получил всероссийский статус. Помимо жителей РО, посетителями фестиваля были гости из Москвы, Санкт-Петербург, Калмыкии, Кубани, Оренбурга, Коми, Новосибирска. Число участников возросло с 300 чел. в 2013 г. до 15 тыс. в 2017 г., а в дальнейшем до XIII фестиваля в 2025 г. ограничивалось 3–7 тыс. чел. Столько же бывает здесь незарегистрированных жителей региона. В начале XXI в. заповедник и его охранную зону ежегодно посещали сотни, в начале 2-го десятилетия – тысячи, в последние годы – десятки тысяч школьников, студентов, членов различных организаций РО, РФ и зарубежья.

На юге страны для ученых, студентов, школьников и всего населения РО и РФ заповедник является ведущим полевым природоохранным центром. Успешную его деятельность в сохранении биоразнообразия, научной, эколого-просветительской работе отмечают международные и отечественные специалисты. На Дону с 1972 г. существует заказник «Цимлянский», получивший федеральный статус в 1983 г. С 90-х гг. XX в. он утратил свои природоохранные функции. Минприроды РФ в 2011 г. возложило на заповедник «Ростовский» обязанности соблюдения режима природного заказника федерального значения «Цимлянский». Заповедник наладил природоохранный режим заказника и восстановил его биоразнообразие. В 2008 г. после посещения МПК специалистами ЮНЕСКО, Международного союза охраны природы (МСОП) заповедник включили во Всемирную сеть биосферных резерватов ЮНЕСКО, а в 2020 г. – в Международный альянс ООПТ (IAPA).

Мониторинг экологических условий и биоразнообразия, ведущийся в заповеднике, свидетельствует о происходящих в последние годы под влиянием аридизации климата и интенсификации хозяйственной деятельности изменениях в живой природе. Это делает необходимым совершенствование правовых основ существования заповедников и других ООПТ, экологической и природоохранной деятельности в новых условиях. За 30 лет работы заповедник выполнил большую природоохранную работу в европейских степях России. Все, кто обеспокоен экологической ситуацией, состоянием биоразнообразия РО, искренне желают коллективу заповедника дальнейших успехов в восстановлении и сохранении природы Донской земли для благополучия и здоровья её населения.

Информация об авторах

В.А. Миноранский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоологии ЮФУ; президент Ассоциации «Живая природа степи».

Ю.В. Тимофеевко – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры зоологии ЮФУ; научный сотрудник Ассоциации «Живая природа степи».

Information about the authors

V.A. Minoransky – Doctor of Science (Agricultural), Professor of the Department of Zoology, SFedU; President of the Association “Wild Nature of the Steppe”.

Yu.V. Timofeenko – Candidate of Science (Biology), Senior Lecturer of the Department of Zoology, SFedU; Researcher, Association “Wild Nature of the Steppe”.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Персоналии

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2025-4-171-173>

Юрий Александрович Федоров (к 80-летию)

Personalities

Yuriy Aleksandrovich Fedorov (to the 80th Anniversary)



Юрий Александрович Федоров – эколог, географ, геолог, кандидат геолого-минералогических наук (1981), доктор географических наук (1992), профессор (1995).

Родился 14 октября 1945 г. в Ростове-на-Дону. В 1963 г. поступил на первый курс геолого-географического факультета Ростовского государственного университета, а в 1968 г. окончил горно-геологический факультет Новочеркасского политехнического института по специальности «Геология и разведка полезных ископаемых». С 1968 по 1970 г. служил в Советской армии на должности командира разведывательно-водолаз-

ного взвода. С 1970 по 1975 г. работал начальником отряда в тресте «РостовДонтизис», участковым геологом на руднике «Октябрьский» Норильского горно-обогатительного комбината, с 1975 по 1980 г. – в РГУ на должности старшего научного сотрудника, совмещая работу с учебой в аспирантуре. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию «Геохимия солей, рассолов, органического вещества и углеводородов верхнеюрских эвапоритовых отложений Северного Кавказа», а в 1992 г. – докторскую диссертацию «Изотопный состав поверхностных и подземных вод и его формирование под влиянием естественных и антропогенных процессов». В 1995 г. ему было присвоено ученое звание профессора. С 1980 по 2003 г. работал в Гидрохимическом институте (Росгидромет) на должности главного научного сотрудника и заведующего созданной им лабораторией изотопного мониторинга качества вод. С 2003 г. по настоящее время – заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы Южного федерального университета (бывший РГУ). Руководит НОЦ «Глобальные и региональные географо-экологические исследования и инновационные технологии», Международной российско-французской ассоциированной лабораторией «Трансформация нефтяного загрязнения в экосистемах поверхностных водных объектов суши, морей, побережий и оценка их устойчивости».

Юрий Александрович – ученый с мировым именем, известный исследователь в области гидрохимии, океанологии, географии и изотопной геохимии подземных вод, автор и соавтор более

600 статей, монографий, справочников, учебников и учебных пособий, изданных в РФ и за рубежом, и патентов на изобретение. Публикации представляют большой интерес для мировой науки и цитируются в зарубежных базах данных. Индекс Хирша по базе данных РИНЦ – 30, Scopus – 13. Он был руководителем гранта Президента РФ «Ведущие научные школы» (с 1996 по 2015 г.). В настоящее время возглавляет научный коллектив гранта Российского научного фонда «Развитие теории формирования, функционирования и эволюции озер европейской части России в условиях антропогенного воздействия и изменения климата». Подготовил 28 кандидатов и 2 докторов наук по географическим, геолого-минералогическим, биологическим и техническим наукам. Его ученики работают в России и странах дальнего и ближнего зарубежья.

Ю.А. Федоров описал эволюцию химического и изотопного состава седиментационных подземных вод и рассолов на различных стадиях литогенеза, доказав, что главным источником их солевого состава является Мировой океан. По его представлениям, трансформация изотопного и солевого состава подземных водных флюидов во времени и пространстве совершается в системе вода – порода – органическое вещество – газы под влиянием термобарических факторов. Им впервые экспериментально изучено и подтверждено на фактическом материале, на примере верхнеюрских соленосных отложений Северного Кавказа, поведение жидких и газовой-жидких включений на различных стадиях литогенеза. Ю.А. Федоров исследовал изотопный состав водорода и кислорода подземных вод и литологический состав коллекторов (на примере Северного Кавказа). Им рассчитаны регрессионные модели поведения стабильных изотопов водорода и кислорода в воде различных коллекторов в зависимости от температуры и глубины их залегания и обосновано использование изотопного состава кислорода подземных вод в качестве «геотермометра». Это дало возможность рассчитать глубину заложения корней грязевых вулканов и вод нефтяных месторождений.

Юрий Александрович разработал новое научное направление – изотопно-химический мониторинг морских и пресноводных экосистем. Руководил экспедициями и применил пионерскую методику и методологию масштабных изотопно-химических исследований пресноводных водоемов, водотоков, эстуариев и внутренних морей, расположенных на территории бывшего СССР (реки Дон, Кубань, Волга, Селенга и др., озера Байкал, Ладожское и др., моря Аральское, Азовское, Каспийское, Черное и др.), побережье Средиземного моря и Атлантического океана. Впервые оконтурил зоны антропогенного влияния крупных промышленных объектов (Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат, Астраханский газоконденсатный комплекс и др.) на воду и донные отложения и сделал количественный расчет их вклада в загрязнение водоемов и водотоков. Разработал и апробировал методику идентификации разливов нефти и нефтепродуктов с использованием метода стабильных изотопов и модели трансформации нефти во времени и пространстве. Выдвинул и теоретически обосновал криогенную гипотезу происхождения и эволюции гидросферы, в основе которой лежат представления об изначальном присутствии на нашей планете воды в газогидратном состоянии. Обнаружил изотопный эффект, связанный с синхронным фракционированием стабильных изотопов серы сульфатных и углерода гидрокарбонатных ионов в воде оз. Байкал, вызванным мощным антропогенным воздействием на экосистему озера. Создал изотопно-химические модели, адекватно иллюстрирующие то, что формирование кислых шахтных вод происходит при смешении сульфатов, образовавшихся при бактериальном и химическом окислении пирита, подземных вод, поровых растворов и атмосферных осадков. Сделал количественную оценку выноса ртути р. Северная Двина в Белое море. Выявил скачкообразный характер изменения концентраций валовой ртути с общей тенденцией к их уменьшению с глубиной. Установил природные вариации концентрации ртути и «фоновое значение» для бассейна Белого моря. Показал, что на распределение концентраций ртути по разрезу донных осадков оказывают влияние как антропогенные, так и природные факторы и процессы. По мере удаления от морской границы устьевой области р. Северная Двина её роль в поставке ртути в Белое море снижается, а глобального и регионального атмосферного массопереноса элемента – возрастает. Содержание ртути использовано им в качестве индикатора проявления оползневых процессов в Кандалакшском заливе Белого моря. Изучена хронология накопления элемента в донных осадках Белого моря и рассчитана доля ртути антропогенного происхождения. Впервые в мире разработал модели, адекватно описывающие связи между эмиссионными потоками и содержаниями метана, с одной стороны, и температурой в мелководных водных объектах – с другой. На основании

комплексного анализа гидрохимических, изотопных и гидрологических показателей уточнил параметры зон смешения река – эстуарий – море. Установил важные пространственно-временные закономерности формирования и трансформации потоков биогенных элементов, органического углерода, внеклеточных ферментов, метана, ртути, тяжелых металлов, нефтяных компонентов и других веществ в системе атмосфера – вода – донные отложения в Азовском море. Разработал и реализовал на практике методику изотопно-химической идентификации источников загрязнения окружающей среды при разливах нефти и нефтепродуктов; отследил многолетнюю динамику трансформации нефтяных slickов в зонах разливов нефти на малых реках бассейна р. Дон, побережьях Черного моря, Керченского пролива, Атлантическом побережье Франции и Испании. Для Азовского моря по результатам послойных радиологических исследований (удельной активности америция-241 и цезия-137) колонок донных отложений и суточных экспериментов с использованием седиментационных ловушек установил закономерности пространственного распределения техногенных радионуклидов и многолетнюю динамику скорости осадконакопления. Для экосистемы Азовского моря обнаружил прямую гиперболическую связь между содержанием взвешенного вещества в воде и объемным содержанием тяжелых металлов во взвеси, с одной стороны, и обратную связь с удельной концентрацией – с другой. Рассчитал регрессионные зависимости между численностью сульфитредуцирующих клостридий и концентрациями метана и сероводорода и поставил эксперименты по их генерации *in vitro*, которые подтвердили вовлеченность сульфитредуцирующих клостридий в процессах образования метана и сероводорода в донных отложениях морских и пресноводных объектов.

Награжден Правительством СССР юбилейной медалью «За воинскую доблесть» (1970), орденом правительства Французской Республики «Кавалер ордена Академических пальм», нагрудным знаком «Почетный работник Гидрометеослужбы России», почетными грамотами руководства Росгидромета, Минобрнауки и ректора ЮФУ, почетным дипломом РФФИ, дипломом первого вице-президента РГО, академика РАН Н.С. Касимова за организацию и проведение образовательной акции «Всероссийский географический диктант», дипломом победителя конкурса преподавателей вузов «Золотые имена высшей школы», медалью «За доблестный труд на благо Донского края», памятным знаком «85 лет Ростовской области»

Сердечно поздравляем Юрия Александровича с юбилеем и желаем ему здоровья и новых творческих успехов в научной и педагогической деятельности!

О.В. Назаренко, А.В. Михайленко, И.В. Доценко, А.Н. Кузнецов

Коллектив редакции и редколлегии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» от всей души поздравляет Юрия Александровича, многолетнего автора и члена редколлегии нашего журнала, с 80-летием и желает ему крепкого здоровья, счастья и творческих успехов, а также энергии и вдохновения для новых свершений!

**Указатель материалов, опубликованных в журнале
«Известия высших учебных заведений.
Северо-Кавказский регион. Естественные науки» в 2025 г.**

К 110-ЛЕТИЮ ЮФУ

Ватульян А.О., Ворович Л.С., Карякин М.И. О развитии механики деформируемого твердого тела в Ростовском университете 3

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Абанин А.В., Литвинов А.А.* Представляющие системы в пространствах с топологиями, задаваемыми наборами квазипреднорм..... 1
- Авсянкин О.Г., Тихонова Г.А.* Ограниченность интегральных операторов с однородными ядрами в L_p -пространствах с радиальным весом..... 3
- Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С.* О контактной задаче на анизотропном композите со штампом в форме тупоугольного клина 2
- Бештоков М.Х.* Компактно-разностная схема для уравнения колебания струны..... 3
- Бибик Ю.В.* Прогнозирование распространения опасных вирусных заболеваний с использованием гамильтонова формализма и фактических данных динамики COVID-19..... 1
- Ватульян А.О., Дударев В.В., Нестеров С.А.* Идентификация переменных термомеханических характеристик в классе полиномов для модели термоупругости 4
- Гетман В.А., Долгих Т.Ф.* Задача Коши для описания поведения плоской электромагнитной волны в анизотропной среде..... 1
- Данилова Н.В., Колесникова Е.А.* Вычисление цен опционов в моделях с неопределённой волатильностью при помощи формул Беллмана 3
- Маннаников Р.С.* О существенной и ω -существенной нормах линейного оператора на весовых пространствах последовательностей..... 4
- Сумбатьян М.А., Боев Н.В., Харитонов В.С.* Эффекты фокусировки при отражении волн от внутренней границы эллипса 1
- Сумбатьян М.А., Максимова О.Г., Петрова Т.О.* Метод граничного интегрального уравнения в коротковолновом рассеянии волн на поверхности с периодической нерегулярностью 3
- Сумбатьян М.А., Титаренко Е.А.* Эффективный метод расчета собственных частот для волнового уравнения внутри трапецевидной области 2
- Хопёрский А.Н., Надолинский А.М., Конеев Р.В., Толкунова Ю.Н.* О дипольном приближении в теории атома 2
- Хубежты Ш.С., Плиева Л.Ю.* Квадратурные формулы для сингулярных интегралов на отрезке интегрирования с фиксированными узлами..... 4
- Чебаков М.И., Колосова Е.М.* Контактная задача для пороупругого цилиндра конечных размеров на винклеровском основании 3
- Чебаков М.И., Колосова Е.М.* Плоская контактная задача о взаимодействии упругого штампа с кусочно-однородной упругой конструкцией, лежащей на винклеровском основании 4
- Шармин В.Г., Шармин Д.В., Шармина Т.Н.* О некоторых свойствах k -поверхности без кручения в $(n+k)$ -мерном евклидовом пространстве 2

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Аджиева А.А., Керефова З.М.* Исследование взаимосвязи грозовой активности конвективных облаков с процессами градообразования 3
- Анциферова М.А.* Концентрации микропластика в некоторых реках и водохранилищах Юга России 1
- 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..... 1
- Ашабоков Б.А., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Барекова М.В., Кешиева Л.А., Теунова Н.В.* Адаптация системы производства сельхозпродукции отраслевого уровня к изменению климата 4
- Воробьев Н.В., Воробьев А.Н., Ипполитова Н.А.* Развитие опорных городов Транссибирского экономического коридора 4

Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Попов Ю.В., Андреев Ю.А., Мякинников И.О., Тамбиева Н.С., Талпа Б.В., Назаренко О.В. Подземные источники западной прибрежной зоны гиперсоленого озера Баскунчак: гидрохимические особенности и эмиссия парниковых газов	2
Глинка В.В., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. Скорость смещения берегов и объемы утраченных земель в пределах Волгоградского водохранилища по материалам обследований с использованием БПЛА и историческим спутниковым данным.....	3
Дахова О.О., Куповых Г.В., Керефова З.М., Каирова Л.Л. Современное состояние подземных питьевых и технических вод Кабардино-Балкарии	3
Джумаян Н.Р. Особенности формирования, состав, качество и технологические свойства углей Мугунского месторождения (Иркутский угольный бассейн).....	2
Дорошенко В.В., Болгов И.А. Динамика площади открытых песков на востоке Ставропольского края в 2022–2024 годы.....	4
Ергина Е.И., Алексахин И.В., Дубас В.В., Литвин В.А., Хижняк Ю.С. Эколого-геохимическая характеристика содержания тяжелых металлов в почвах под лесными экосистемами Карадагского природного заповедника.....	3
Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Фаррахова Н.Н. Минералогия медных шлаков Уктусского металлургического завода.....	1
Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Леонова Л.В. Минералогия шлаков Лялинского медного завода (село Караульское, Свердловская область)	4
Захарихина Л.В., Лесникова П.С., Рогожина Е.В., Керимзаде В.В., Бригида В.С. Геохимия атмосферных осадков в прибрежной зоне Сочинского Причерноморья... ..	1
Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Александрова А.Б., Валиев В.С., Хасанов Р.Р. Абиотические факторы в зарастании озер прибрежно-водной растительностью	4
Зорин Д.А. Особенности изменения агроклиматических показателей Удмуртской Республики	2
Комаров Р.С. Региональные особенности сезонной изменчивости ионного стока в бассейне реки Кубани.....	2
Лобусев А.В., Салахова Л.Н., Бочкарев В.А., Антипова Ю.А. Онтогенез углеводородов Каспийского моря	1
Ненашева Г.И., Копытина Т.М., Козырева Ю.В., Минакова А.Е. Медоносные растения предгорных районов Алтайского края: возможности определения географического происхождения меда	4
Ревуцкая И.Л., Ревуцкая О.Л., Позднякова Т.М., Суриц О.В. Количественный анализ распределения железа и марганца в поверхностных водах Еврейской автономной области	2
Соловьев И.А., Зольникова Ю.Ф., Щитова Н.А., Акинин Д.Г. Территориальные особенности миграционных процессов в российских городах.....	4
Стребкова А.С., Карманова М.В., Ненашева Г.И. Характеристика фаз весенне-летнего сезона года на примере территории Алтайского края.....	4
Тимошенко Д.В. Особенности электродного эффекта в приземном слое атмосферы в условиях неоднородного рельефа земной поверхности.....	1
Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Суточная динамика атмосферного электрического поля в турбулентно-конвективном приземном слое.....	2
Федоров Ю.А., Доценко Н.В., Костенко Д.Ф., Головкин И.В., Станиславский К.С. О содержании ртути в поверхностных водах бассейна озера Байкал по результатам экспедиционных исследований	2
Федоров Ю.А., Косолапов А.Е., Гарькуша Д.Н., Дмитрик Л.Ю., Усова Е.В. Сульфиды и метан в донных отложениях и затопленных почвах Цимлянского водохранилища	3
Хаванский А.Д., Богачев И.В., Эртель А.Б., Меринова Ю.Ю. Современные природно-антропогенные ландшафты и территориальные комплексы Ростовской области	2
Хаванский А.Д., Эртель А.Б., Богачев И.В., Меринова Ю.Ю. Конструктивная география и устойчивое развитие региона	3
Шадринова О.В., Легостаева Я.Б. Техногенный педогалогенез на территории Алакит-Мархинского кимберлитового поля (Якутия, Россия)	3
Щербина В.Г. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами автотранспорта в пригородной зоне Сочинского Причерноморья.....	2
Яицкая Н.А. Районирование акваторий и берегов Азовского моря и Северного Каспия для оценки воздействия ансамблей опасных гидрометеорологических явлений.....	4

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Аухадиева Э.А., Даукаев Р.А., Мусабиров Д.Э., Аллаярова Г.Р., Афонькина С.Р., Зеленковская Е.Е. Оценка уровня содержания нитратов в плодовоовощной продукции	2
Бирюкова О.А., Ильченко Я.И., Ерин В.А. Влияние технологии no-till на фосфатное состояние черноземов обыкновенных Ростовской области.....	4

Бисултанова З.И., Джамбетова П.М. Анализ эффективности SSR-маркеров для генотипирования некоторых видов лекарственной флоры	3
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>Raenibacillus</i> , выделенных из ризосферы пшеницы озимой (<i>Triticum aestivum</i> L.). Часть 2	1
Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А. Некоторые морфологические и биохимические особенности винных штаммов дрожжей <i>S. cerevisiae</i> в условиях стресса	3
Лиджиева Н.Ц., Бадмаева Г.Д., Очирова А.С. Полихромные ценопопуляции <i>Tulipa suaveolens</i> Roth (Liliaceae): структура морфологической изменчивости и виталитетная структура	2
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)	1
Мазанко М.С., Празднова Е.В., Амирджанов Ф.Ф., Брень А.Б., Емельянец С.А. Механизмы формирования и контроля растениями ризосферной микробиоты: современные представления о взаимодействии в системе растение – микроорганизм	4
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)	1
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	1
Сидоренко М.Л., Нестерова О.В. Вклад микроорганизмов в углеродный баланс: эмиссия и секвестрация CO ₂ почв	2
Сухомлинова В.Н., Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Русева А.С. Изменение щелочно-кислотных свойств почв при загрязнении разными соединениями лития	4
Чистяков В.А., Савенков Д.Н., Суханов М.К., Брень А.Б. Принципы организации вычислений в эукариотических, прокариотических клетках и бактериальных биопленках и их применение в кибернетических системах: перспективы кибербионики	4

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

Минкина Т.М., Решетняк О.С. Международная научная конференция «Водосбор – река – устье: исследование эрозии почв, русловых и устьевых процессов» (г. Ростов-на-Дону, 15–18 сентября 2025 года)	4
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.)	1
Миноранский В.А., Тимофеев Ю.В. 30 лет на службе охраны природы (биосферному заповеднику «Ростовский» – 30 лет)	4
Миноранский В.А., Тимофеев Ю.В., Гриценко М.В. Красота и богатство донских степей	3

ШТРИХИ К ПОРТРЕТУ

Ерусалимский Я.М. Игорь Борисович Симоненко (к 90-летию со дня рождения)	3
---	---

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Владимир Исаакович Минкин (к 90-летию)	1
Карякин М.И., Ватульян А.О. Михаил Иванович Чебаков (к 80-летию)	3
Любовь Семеновна Ворович	3
Назаренко О.В., Михайленко А.В., Доценко И.В., Кузнецов А.Н. Юрий Александрович Федоров (к 80-летию)	4
Налбандян Ю.С. Александр Васильевич Абанин (к 70-летию)	1
Рябов Г.В., Закруткин В.Е. Анатолий Иванович Гавришин (к 85-летию)	3

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

Подписано в печать 22.12.2025. Выход в свет 25.12.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 20,46. Уч.-изд. л. 20,85. Тираж 250 экз. Заказ № 10272.

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

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

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

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

Signed print December 22, 2025. The publication December 25, 2025. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 20.46. Publ. sign. 20.85. Edition 250 copies. Order number 10272.

Address of Editorial Board: 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 105/42,
SFU, journal “Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science”,
e-mail: izvestiya@sfedu.ru, Web Address: www.izvestiya.sfedu.ru

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

Printed in the printing department, and corporate souvenirs,
Publishing and printing complex KIBI MEDIA CENTER, SFU,
344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 1, room 104, phone (863) 243-41-66

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», ИВИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

Е-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru