

ISSN 1026-2237

DOI 10.18522/1026-2237

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2024

1

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

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

Редакционная коллегия:

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

Учредители:

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

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Main Edition:

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

Editorial Board:

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

The Founders

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1

*Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
Научный журнал
Издаётся с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 1 (221) 2024 г.*

*Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 1 (221) 2024*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

К 110-летию ЮФУ

TO THE 110th ANNIVERSARY OF SFEDU

Ерусалимский Я.М., Шкурый И.А. К истории математического моделирования в Южном федеральном университете 4

Erusalimskiy I.M., Shkuray I.A. On the History of Mathematical Modeling in the Southern Federal University 4

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Землякова И.А. Формирование оптимального кредитного портфеля с использованием нечётко-множественного подхода 17
Норкин М.В. Схлопывание присоединенной каверны при малых числах Фруда после отрывного удара плавающего эллиптического цилиндра 22
Сидорякина В.В. Непрерывная зависимость решений линеаризованной начально-краевой задачи транспорта многокомпонентных наносов от входных данных задачи 30
Хопёрский А.Н., Конеев Р.В., Надолинский А.М. О расширенном пространстве Гильберта 38
Ширяева Е.В., Шокарева А.С., Сибиль В.П. Стационарное протекание несжимаемой вязкой жидкости сквозь двухмерный разветвленный канал 43
Yao Keyu. Parameters Estimates on Samples with Contamination 56

Zemlyakova I.A. Formation of an Optimal Loan Portfolio Using a Fuzzy-Multiple Approach 17
Norkin M.V. Collapse of the Attached Cavity at Low Froude Numbers after a Separation Impact of a Floating Elliptical Cylinder 22
Sidoryakina V.V. Continuous Dependence of Solutions to the Linearized Initial-Boundary Value Problem of Transport of Multicomponent Sediments on the Input Data of the Problem 30
Hopersky A.N., Koneev R.V., Nadolinsky A.M. On the Extended Hilbert Space 38
Shiryayeva E.V., Shokareva A.S., Sibil V.P. Stationary Flow of Incompressible Viscous Fluid Through a Two-Dimensional Branched Channel 43
Yao Keyu. Parameters Estimates on Samples with Contamination 56

Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Ковалев Е.А., Талпа Б.В., Андреев Ю.А., Тамбиева Н.С., Краснова Е.А. Подземные источники балки Пещерная озера Баскунчак: гидрохимические особенности и эмиссия парниковых газов.....	63	Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Kovalev E.A., Talpa B.V., Andreev Yu.A., Tambieva N.S., Krasnova E.A. Underground Sources of the Peshchernaya Beam of Lake Baskunchak: Hydrochemical Features and Greenhouse Gas Emissions.....	63
Красноярова Б.А., Назаренко А.Е., Плуталова Т.Г., Шарабарина С.Н. Особенности оценки углеродного следа в сельском хозяйстве: сравнительный анализ методических подходов.....	76	Krasnoyarova B.A., Nazarenko A.E., Plutalova T.G., Sharabarina S.N. Features of Assessment the Carbon Footprint in Agriculture: Comparative Analysis of Methodological Approaches	76
Латышева Л.А. Влияние природных и антропогенных факторов на формирование микроэлементного состава буроземов острова Рейнеке	89	Latyшева L.A. The Influence of Natural and Anthropogenic Factors on the Formation of the Microelement Composition of Burozems of Reinecke Island	89
Склярченко Г.Ю., Шехурдин Г.Р. Особенности теплового поля города Ростова-на-Дону по данным дистанционного зондирования Земли	97	Sklyarenko G.Yu., Shehurdin G.R. Features of the Thermal Field of the City of Rostov-on-Don According to Remote Sensing Data	97
Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Гарькуша Д.Н., Дотченко И.В. Метан и сульфитредуцирующие кластридии как показатели экологического состояния пеллоидов гиперсоленых озер	105	Fedorov Yu.A., Trubnik R.G., Garkusha D.N., Dotsenko I.V. Methane and Sulfite-Reducing Clostridia as Indicators of Ecological State of Peloids in Hypersalt Lakes.....	105

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Бархалов Р.М., Рамазанова Д.М., Хлопкова М.В., Мирзаханов М.К. К изучению биологии судака (<i>Sander lucioperca</i>) в изменившихся экологических условиях северной части Аграханского залива Каспийского моря	118	Barkhalov R.M., Ramazanova D.M., Khlopkova M.V., Mirzakhanov M.K. The Study the Biology of Walleye (<i>Sander Lucioperca</i>) in the Changed Ecological Conditions of the Northern Part of the Agrakhan Bay of the Caspian Sea.....	118
Бурукина Е.А., Колесников С.И., Яковлева Л.В., Минникова Т.В. Исследование фитотоксичности почв Астраханской области, подверженных пастбищной дигрессии	126	Burukina E.A., Kolesnikov S.I., Yakovleva L.V., Minnikova T.V. Study of Phytotoxicity of Soils of the Astrakhan Region Exposed to Pasture Digression	126
Дмитриева М.В., Павлов В.А., Афанасьева П.С., Золотухина Е.В. Разработка технологии получения нового биоэлектрокатализатора – «грубого» экстракта <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	133	Dmitrieva M.V., Pavlov V.A., Afanasyeva P.S., Zolotukhina E.V. Development of Technology for Obtaining a New Bioelectrocatalyst - "Crude" Extract of <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	133
Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А. Влияние геотермальной воды в составе твердых сред культивирования на морфологические свойства дрожжей рода <i>Saccharomyces</i>	141	Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Abakarova A.A. Influence of Geothermal Water in the Composition of Solid Cultivation Media on the Morphological Properties of the Yeast Genus <i>Saccharomyces</i>	141
Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Тимофеева Я.О., Емельянов А.Н., Клочкова Н.Л. Влияние различных фитомелиорантов на плодородие и оптические показатели агрогенных почв Приморья.....	152	Purtova L.N., Kiseleva I.V., Timofeeva Ya.O., Emel'yanov A.N., Klochkova N.L. Effects of Various Phytomeliiorants on Fertility and Optical Indicators of Agro-genic Soils of Primorye.....	152
Храпай Е.С., Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Казеев К.Ш. Оценка здоровья почвы рекультивированного хвостохранилища по показателям фитотоксичности.....	162	Khrapay E.S., Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh. Assessment of the Soil Health of a Reclaimed Tailings Dump by Phytotoxicity Indicators	162

ПАМЯТИ КОЛЛЕГИ

IN MEMORY OF A COLLEAGUE

Виктор Исидорович Литвиненко (04.11.1940–25.01.2024)	169	Victor Isidorovich Litvinenko (04.11.1940-25.01.2024)	169
--	-----	---	-----

К 110-ЛЕТИЮ ЮФУ

TO THE 110th ANNIVERSARY OF SFEDU

Научная статья

УДК 004.942

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-4-16

К ИСТОРИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЮЖНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Яков Михайлович Ерусалимский^{1✉}, Ирина Александровна Шкурай²

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

¹ ymerusalimskiy@sfedu.ru ✉

² shkuray@sfedu.ru

Аннотация. Статья посвящена истории математического моделирования в Ростовском государственном университете (РГУ), ныне – Южном федеральном университете (ЮФУ). Авторы описывают её с 1950 г. Как и во всём мире, её начало связано с задачами механики. В РГУ её основоположниками принято считать И.И. Воровича и Н.Н. Моисеева, будущих академиков РАН. Расцвет работ по математическому моделированию связан с открытием в РГУ вычислительного центра (1958 г.), а затем Научно-исследовательского института механики и прикладной математики (1971 г.), где была создана имитационная модель Азовского моря, за которую её разработчики были удостоены Государственной премии СССР.

Рассмотрена история не только математического моделирования как научного направления, но и его становления как учебного предмета на механико-математическом факультете (ныне – Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ).

Ключевые слова: математическое моделирование, механика, имитационное моделирование, вычислительный эксперимент

Для цитирования: Ерусалимский Я.М., Шкурай И.А. К истории математического моделирования в Южном федеральном университете // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 4–16.

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

Original article

ON THE HISTORY OF MATHEMATICAL MODELING IN THE SOUTHERN FEDERAL UNIVERSITY

Iakov M. Erusalimskiy^{1✉}, Irina A. Shkuray²

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

¹ ymerusalimskiy@sfedu.ru ✉

² shkuray@sfedu.ru

© Ерусалимский Я.М., Шкурай И.А., 2024

Abstract. The article is devoted to the history of mathematical modeling at Rostov State University (RSU), now Southern Federal University (SFU). The authors have been describing it since 1950. As elsewhere in the world, its beginnings are associated with problems of mechanics. At the Rostov State University, its founders are considered to be I.I. Vorovich and N.N. Moiseev, future academicians of the Russian Academy of Sciences. The flourishing of work on mathematical modeling is associated with the opening of a computer center at the Rostov State University (1958), and then a research institute of mechanics and applied mathematics (1971), where a simulation model of the Sea of Azov was created, for which its developers were awarded the USSR State Prize.

The article examines not only the history of mathematical modeling as a scientific direction, but also the history of its formation as an academic subject at the Faculty of Mechanics and Mathematics (now the I.I. Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science of the SFU).

Keywords: mathematical modeling, mechanics, simulation modeling, computational experiment

For citation: Erusalimskiy I.M., Shkuray I.A. On the History of Mathematical Modeling in the Southern Federal University. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):4-16. (In Russ.).

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

Математическое моделирование как отдельная математическая дисциплина сформировалось сравнительно недавно. Однако его истоки уходят достаточно глубоко в историю науки. Первыми учеными в области математического моделирования были, вероятно, И. Ньютон и Л. Эйлер. Законы механики И. Ньютона – это математические модели движения тел, в том числе в поле тяготения. Л. Эйлер в 1749 г. опубликовал двухтомник *Scientia navalis, seu tractatus de constructione ac dirigendis navibus* – полное и систематическое изложение теории равновесия и устойчивости судов. В этой работе он рассмотрел вопросы качки на зыби, формы судов и кораблестроения, движения судов силой ветра и их управления. Всего по гидромеханике и гидродинамике Л. Эйлер написал 20 мемуаров (так назывались раньше научные труды). Эти труды великого ученого, безусловно, можно отнести к математическому моделированию.

Всю механику, несомненно, можно считать наукой о математическом моделировании задач о движении (твердых тел, жидкостей, газов) и поведении тел и конструкций под действием нагрузок, как статических, так и динамических. Современная механика в основном перешла от натуральных экспериментов к вычислительным, т.е. к экспериментам не с реальным объектом или его физической моделью, а к проводимым с помощью математической модели.

Новый этап в развитии математического моделирования, начало которого приходится на середину XX в., связан с появлением мощного вычислительного средства – компьютера (ЭВМ) и двумя проектами – атомным (разработка ядерного и термоядерного оружия) и ракетно-космическим. Ни тот, ни другой не могли быть реализованы не только без достижений физики и техники, но и без разработки и использования средств и методов математического моделирования.

Эти проекты разрабатывались и осуществлялись параллельно и независимо в двух странах, которые теперь называют ядерными сверхдержавами: в СССР и США. К счастью, этот проект в СССР был успешно и практически параллельно с США выполнен. Тем самым был обеспечен паритет в области современных вооружений, который стал залогом безопасности всего человечества.

Имена выдающихся физиков, работавших над атомным проектом, хорошо известны – это академики И.В. Курчатов, Б. Я. Зельдович, А.Д. Сахаров, Ю.Б. Харитон. А вот имена математиков известны далеко не всем. Это академики А.Н. Тихонов, С.Л. Соболев, А.А. Самарский, М.В. Келдыш, Л.В. Канторович. А.Н. Тихонов и А.А. Самарский построили первую математическую модель атомного взрыва и динамики термоядерного взрыва. До натуральных испытаний были эксперименты на математических моделях. Проведенные затем испытательные взрывы показали высокую точность результатов, предсказанных вычислительными экспериментами.

В числе выдающихся достижений в области ядерной энергетики – работы В.П. Маслова, В.П. Мясникова, В.Г. Данилова по математическому моделированию аварии на Чернобыльской АЭС [1]. Большой вклад в создание модели внёс академик В.С. Авдудевский.

Наша статья посвящена истории математического моделирования в Ростовском государственном университете (до 2007 г.), а ныне – Южном федеральном университете (с 2007 г.).

Научные исследования по математическому моделированию в ЮФУ (РГУ)

Авторы полагают, что точкой отсчета следует считать 1950 г., когда в Ростовский госуниверситет приехали молодые талантливые ученые Иосиф Израилевич Ворович и Никита Николаевич Моисеев, ставшие впоследствии академиками, выдающимися механиками и специалистами в области математического моделирования.

Первыми работами по математическому моделированию, выполненными под их руководством в РГУ, стали дипломная работа В.И. Юдовича (1957 г., рук. И.И. Ворович) [2] и кандидатская диссертация С.В. Жака «О движении гироскопа с полостью, заполненной жидкостью» (1959 г., рук. Н.Н. Моисеев).

Появились и реальные заказчики математических моделей. Этому способствовал новый вид научных работ, называемых хозяйственными договорами и финансируемых не государством, а конкретными заказчиками. Для Новокраматорского машиностроительного завода был выполнен первый в РГУ хозяйственный договор по математическому моделированию технологического процесса горячей посадки бандажей на зубчатые колеса прокатных станков и шахтных подъемников [3]. Все расчеты на моделях выполнялись на арифмометрах «Феликс».

Развитие работ по математическому моделированию в РГУ сдерживалось отсутствием в университете ЭВМ и вычислительного центра. В 1958 г. открылась вычислительная лаборатория при кафедре дифференциальных и интегральных уравнений, преобразованная затем в ВЦ РГУ (с 1996 г. – ЮГИНФО). Переломным стал 1960 г., когда в университете появилась ЭВМ «Урал-1» (100 операций/с). На этой ЭВМ были реализованы и первые компьютерные программы, которые следует отнести к искусственному интеллекту.

Молодой талантливый математик Рудольф Хафизович Зарипов был в числе первых в мире разработчиков компьютерных программ создания музыки. На нашем «Урале-1» написан первый цикл компьютерных музыкальных произведений. Он назван Р.Х. Зариповым «Уральские напевы» и был исполнен симфоническим оркестром Ростовской филармонии (можно прослушать по ссылке <https://www.youtube.com/watch?v=jiOre2MROGg>). Обращение Р.Х. Зарипова к музыке было естественным – кроме математического образования, он имел и музыкальное. Результатом его исследований стала монография [4].

Появление ЭВМ замкнуло цикл в технологии математического моделирования модель – программа – вычислительный эксперимент (термин А.Н. Тихонова).

Работы по математическому моделированию и методам расчета емкости конденсаторов сложной формы, выполненные И.Б. Симоненко, В.И. Юдовичем, В.П. Захарютой и программистами-математиками Е.С. Чубуковой (Невской), А.А. Чекулаевой, Л.С. Шацких, – одни из первых работ полного цикла [5, 6].

Следующие глубокие результаты в области математического моделирования – работы И.Б. Симоненко и С.М. Зеньковской по математическому моделированию конвекции, в том числе и в невесомости. Вот что о них написано в статье А.В. Перминова и Т.П. Любимовой [7]: «Известно, что высокочастотные колебания полости с жидкостью в неоднородном поле температуры вызывают вибрационно-конвективное течение, в котором все физические поля разделяются на пульсационную и осредненную компоненты. Когда период колебаний системы остается много меньше всех гидродинамических времен, а амплитуда смещения в некотором смысле мала, становится возможным применение метода осреднения, позволяющего получить замкнутую систему уравнений для осредненных и пульсационных полей. Вывод уравнений термовибрационной конвекции на основании этого метода был впервые предложен И.Б. Симоненко и С.М. Зеньковской». Из полученных ими результатов [8] следовала возможность возникновения вибрационной конвекции в невесомости. В дальнейшем эти результаты неоднократно подтверждались в натуральных экспериментах, поставленных в космосе американскими и отечественными исследователями [9].

Научным достижением в области математического моделирования в РГУ нужно назвать цикл работ, проведенных В.И. Юдовичем, М.Ю. Жуковым, Н.В. Петровской, Л.И. Сазоновым, О.А. Цывенковой и др. по математическому моделированию процессов электрофореза, в том числе и в невесомости [10–15]. Полученные фундаментальные результаты составили основу монографий [11, 12] и докторской диссертации М.Ю. Жукова «Математическое моделирование массопереноса электрическим полем в многокомпонентных химически активных средах» (2006 г.).

Все перечисленные выше результаты находились в области классического математического моделирования, идущей от работ И. Ньютона и Л. Эйлера, когда математическая модель представляла собой дифференциальные, интегральные, интегро-дифференциальные уравнения, описывающие поведение моделируемого процесса или объекта. Далее для нахождения решений уравнений модели применялись приближенные (численные) методы. Именно на этом этапе использовалась вычислительная техника. В случае такого подхода моделью иногда считают саму компьютерную программу, с помощью которой осуществляются вычисления.

Как правило, математическая модель, полученная в виде системы уравнений, оказывается сложным математическим объектом, к которому непосредственно численные методы плохо применимы. Необходим этап перехода к более простой математической модели, которая, возможно, не является точной, но обладает способностью быть как угодно близкой к точной модели.

Получаемая приближенная математическая модель оказывается более удобной для применения численных методов. Такой подход к математическому моделированию оказался эффективным. Особенно, как показали работы В.И. Юдовича (метод линеаризации) и И.Б. Симоненко (метод осреднения), в задачах математической гидродинамики.

Новый этап истории математического моделирования в РГУ (ЮФУ) связан с открытием в 1971 г. Научно-исследовательского института механики и прикладной математики (НИИ МиПМ). Основатель института И.И. Ворович одним из важнейших направлений деятельности НИИ МиПМ считал математическое моделирование, полагая его самым возможным способом доведения результатов фундаментальных исследований до практических приложений.

Ректор РГУ Юрий Андреевич Жданов – главный инициатор создания в университете системы научно-исследовательских институтов – и Иосиф Израилевич Ворович полагали, что научно-исследовательский институт – подразделение, в котором решаются более масштабные научные задачи, чем на кафедрах университета. Именно им принадлежит идея разработки в НИИ МиПМ математической модели такого сложного природно-хозяйственного объекта, как Азовское море.

Азовское море как природный объект уникально, поскольку представляет собой сообщающийся с Черным морем сосуд, имеющий показатели солености воды намного ниже, чем Черное море. Это отличие обеспечивается постоянным поступлением в Азовское море больших объемов пресной воды из питающих его рек – Дона и Кубани. Водобмен между сообщающимися сосудами шел всегда (в течение тысячелетий) через Керченский пролив в одном направлении – из Азовского моря в Черное. Это и обеспечивало практически пресноводность Азовского моря.

Эта пресноводность и создавала уникальное отличие Азовского моря от других морей с точки зрения его биологии. Оно было средой обитания не морской фауны, а речной. Это делало его уникальным рыбопромысловым районом нашей страны. В Азовском море и питающих его реках обитали и вылавливались в промышленных объемах ценные породы рыб (осетр, белуга, стерлядь, рыбец, тарань, шемая и др.).

Однако к середине 60-х гг. XX в. стало ясно, что существовавшее тысячелетиями равновесное состояние водообмена между Азовским и Черным морями не является устойчивым. Строительство Цимлянской ГЭС, мелиорация сельского хозяйства, увеличение выращивания риса в Краснодарском крае привели к резкому падению поступления пресной воды из Дона и Кубани в Азовское море. К тому же и качество речных вод резко ухудшилось, в первую очередь из-за химизации сельскохозяйственного производства. Речные воды стали содержать недопустимо большие количества гербицидов и минеральных удобрений. Ситуация осложнялась и увеличившимся количеством промышленных стоков (Северодонецкий химкомбинат), поступавших в эти реки, в том числе через Северский Донец. Соленость Азовского моря начала нарастать, а рыбопродуктивность – резко падать.

Важность для страны Азовского моря как объекта хозяйственной деятельности требовала принятия чрезвычайных мер по его спасению. Остро обсуждались два проекта – строительство дамбы в Керченском проливе для отсечения соленого Черного моря от пресного Азовского и переброска пресных вод сибирских рек в европейскую часть страны для восстановления полноводности Волги и Кубани (эти проекты решили бы задачу спасения Каспийского и Азовского морей). Оба проекта требовали колоссальных финансовых вложений, неподъемных для экономики СССР. К тому же их эффективность не была обоснована и оставалась под сомнением. Высказывались серьезные опасения, что реализация первого проекта могла привести к обмелению и высыханию Азовского моря. Что касается переброски сибирских вод в европейскую часть

СССР, то это могло привести к глобальным и непоправимым климатическим изменениям на территории всей страны.

Построение математической модели Азовского моря давало бы возможность с помощью вычислительного эксперимента получить ответы на вопросы эффективности предлагаемых проектов, а также проанализировать эффективность других возможных вариантов.

Ясно, что модель должна была быть комплексной, т.е. описывать не только параметры солености воды Азовского моря, его гидрологии, но и его биологическую продуктивность, и не абстрактную (например, в миллионах тонн), а именно в разрезе видового состава рыб.

Что касается химии вод и гидрологии, то было понятно, что возможно построение классической математической модели. А вот всё, что касалось моделирования его биологии, классическому математическому моделированию не поддавалось. Стало понятно, что нужно строить математическую модель другого класса – имитационную, а опыта разработки таких моделей у математиков РГУ не было. Смелый и неожиданный выход предложил Ю.А. Жданов – привлечь к работам над моделью соответствующего специалиста со стороны.

Таким специалистом оказался Александр Борисович Горстко – доктор физико-математических наук, работавший в СО АН СССР (Новосибирский академгородок), ученик лауреата Нобелевской и Государственных премий Л.В. Канторовича. Александр Борисович переехал в Ростов и возглавил в НИИ МиПМ отдел имитационного моделирования эколого-экономических систем.

Отдел создавался с нуля. К работе привлекалась молодежь – выпускники мехматов РГУ и МГУ. Среди них нужно в первую очередь назвать Ф.А. Суркова и Ю.А. Домбровского. Они пришли в НИИ МиПМ в отдел А.Б. Горстко после окончания мехмата МГУ и сразу стали играть роль первых скрипок в команде «имитационных модельеров». Назовем тех участников проекта, работавших в отделе, фамилии которых фигурируют в научных публикациях: Л.В. Абецдарская, В.В. Селютин, Н.С. Задорожная, Г.С. Маркман, В.Г. Ильичев, В.Л. Шустова, Ю.В. Тютюнов, С.В. Бердников, Н.И. Обущенко.

Вот что пишет об отделе Ф.А. Сурков: «Работа началась в 1972 г. небольшим коллективом математиков, который постепенно стал достаточно многочисленным (до 50 чел.), и триумфально завершилась присуждением Государственной премии по науке и технике СССР 1983 г. за работу “Имитационная модель экосистемы Азовского моря, как средство системного анализа, прогнозирования и управления природно-техническим комплексом”. Лауреатами Государственной премии СССР в РГУ стали Ю.А. Жданов, И.И. Ворович, А.Б. Горстко, Ф.А. Сурков, Ю.А. Домбровский.

Имевшаяся к началу работ в РГУ вычислительная техника была недостаточной (в НИИ МиПМ – ЭВМ Одра, а в ВЦ РГУ – ЭВМ Минск-32). Для обеспечения работ над моделью была приобретена самая современная и мощная ЭВМ – БЭСМ-6. О сложности создаваемой модели свидетельствуют её характеристики. Акватория моря была разбита на 7 участков. Каждый район моря характеризовался 120 переменными, таким образом, фазовый портрет всего моря представлял собой вектор размерностью 840. Внутри блоков использовался подход мультимодельности, когда из нескольких вариантов моделирования выбирался самый адекватный по соответствию данным натурных наблюдений. Так, например, блок “Динамика вод”, предназначенный для расчета водообмена между районами Азовского моря и Азовского моря с Черным через Керченский пролив (в зависимости от балансовых составляющих – осадков, испарения, стока рек, а также ветровой ситуации), был выполнен в трех вариантах: 1) подробная модель с использованием классических уравнений гидродинамики и приближенных численных методов их решения на ЭВМ; 2) менее детальная модель, основанная на балансовых соотношениях и учитывающая специфику вызываемых ветром изменений уровня районов Азовского моря; 3) агрегированная модель, использующая соображения гидравлического характера» [16].

Все работы проводились вручную, в отсутствие современного программного обеспечения, предназначенного для создания имитационных моделей.

Если исходить из современных представлений, то сама модель – цифровой двойник Азовского моря, а настройка модели по колоссальному набору имевшихся данных представляла собой то, что теперь называют «технологиями big data».

Вычислительные эксперименты, проведенные на модели, показали, что проект строительства дамбы через Керченский пролив не только не спасет Азовское море от засоления, но и приведет к его обмелению. Огромные площади мелководья превратятся в пересыхающие соленые лужи.

В этом случае грозящая катастрофа создаст на европейской территории страны безжизненное пространство, имеющее на порядок большую площадь, чем та, которая сформировалась на месте пересохшего Аральского моря. Этот вывод, сделанный с помощью вычислительного эксперимента, окончательно закрыл вопрос строительства дамбы в Керченском проливе.

Побочным эффектом разработки модели Азовского моря стали научные публикации [17–20], кандидатские диссертации Ф.А. Суркова и Ю.А. Домбровского, докторская диссертация Ю.А. Домбровского «Пространственно-неоднородные модели водных экосистем. Построение, исследование, приложения» (1985), докторская диссертация Г.С. Маркмана «Пространственно-временная динамика экологических систем. Математические модели» (1989), кандидатские диссертации В.В. Селютина, Н.С. Задорожной, Ю.В. Тютюнова, М.И. Чердынцевой, Г.О. Чарояна и др., а также докторские диссертации Г.А. Угольницкого «Моделирование иерархически управляемых экологических систем» (1996), С.В. Бердникова «Разработка и применение компартментальных моделей для изучения пространственных характеристик морских экологических систем» (2004), Ю.В. Тютюнова «Построение, исследование и приложения математических моделей пространственно-временной динамики популяционных систем» (2009).

Таким образом, в процессе разработки имитационной модели Азовского моря в РГУ (ЮФУ) сформировалась мощная научная школа имитационного моделирования, возглавляемая академиком И.И. Воровичем, профессором А.Б. Горстко и их учениками Ф.А. Сурковым и Ю.А. Домбровским.

Следует отметить, что работа по имитационному моделированию Азовского моря остается уникальной и в каком-то смысле непревзойденной и сегодня. Дело в том, что для подобных по масштабу работ невозможно найти конкретного заказчика, кроме государства. То, что оказалось возможным сделать в СССР, когда существовали академические НИИ и НИИ при вузах, имевшие стабильное бюджетное финансирование, оказалось пока невозможным в новых экономических условиях.

НИИ в СССР имели возможность тратить выделяемые им средства на исследования, тематику которых они определяли самостоятельно, обосновав их необходимость. Эти научные работы могли иметь общегосударственное значение, иногда они вытекали из логики развития самой науки. НИИ имели отдельное финансирование на приобретение научного оборудования, в том числе и такого уникального и дорогостоящего, как БЭСМ-6.

Не будь выполнены эти работы по имитационному моделированию Азовского моря в 80-е гг. XX в., возможно, они бы не были выполнены никогда.

Отметим ещё один интересный факт. Вернемся к началу нашей статьи, где мы написали о том, что историю математического моделирования в РГУ мы ведем от приезда в 1950 г. в Ростов Н.Н. Моисеева и И.И. Воровича. Никита Николаевич проработал в РГУ не так уж долго – до 1955 г. Научная судьба И.И. Воровича и Н.Н. Моисеева опять свела их в достаточно новой области имитационного моделирования. Никита Николаевич в это же время, когда И.И. Ворович занимался работой по моделированию Азовского моря, руководил в ВЦ АН СССР работами по имитационному моделированию последствий ядерной войны («ядерная зима»).

Вероятно, работы по имитационному моделированию Азовского моря послужили стимулом для большого цикла работ, выполненных Львом Абрамовичем Крукиером и его учениками, по классическому моделированию гидрофизических процессов и процессов распространения загрязнений в водоемах. Об этом свидетельствует уже первая работа в этом направлении [21].

Отметим в первую очередь докторскую диссертацию Л.А. Крукиера, защищенную им в признанном центре математического моделирования – Институте математического моделирования РАН, в диссертационном совете под председательством академика А.А. Самарского, «Математическое моделирование гидрофизических процессов в мелких водоемах» (1994) и научные исследования двух его учеников – Г.В. Муратовой и А.Л. Чикина, защитивших докторские диссертации в этом же совете: «Математическое моделирование процессов конвективно-диффузионного переноса в движущихся средах» (2006) и «Разработка и реализация двухслойной математической модели гидрофизических процессов в водоемах с обширными районами мелководья на высокопроизводительных вычислительных системах» (2009). Еще одна ученица – Л.Г. Чикина – защитила докторскую диссертацию в ЮФУ «Развитие специальных итерационных методов для моделирования процесса изменения донной поверхности водоемов» (2010).

Особо следует выделить роль Л.А. Крукиера в области аттестации научных кадров. Он сформировал вместе И.А. Николаевым и много лет (после отъезда И.А. Николаева) руководил диссертационным советом по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Продолжали успешно развиваться и другие исследования в области классического математического моделирования. Они были связаны с разработкой математических моделей для новых классов материалов, в том числе композитных, а также пьезоматериалов и конструкций из них (электроупругость). Последнее обеспечило поддержку методами математического моделирования исследований физиков, химиков и инженеров РГУ (НИИ физики и НКТБ «Пьезоприбор»). Выделим в первую очередь работы Ю.А. Устинова, И.П. Гетмана, А.В. Белокопя, А.О. Ватульяна, Н.В. Боева, А.В. Наседкина, М.А. Сумбатяна и их учеников.

Фундаментальными работами в этом направлении являются монографии Ю.А. Устинова и И.П. Гетмана [22], докторские диссертации А.В. Белокопя «Колебания и волны в полуограниченных и ограниченных телах» (1987), И.П. Гетмана «Математическая теория нерегулярных твердых волноводов» (1991), А.О. Ватульяна «Метод граничных интегральных уравнений в динамических задачах анизотропной теории упругости и электроупругости» (1991), М.А. Сумбатяна «Исследование высокочастотных волновых процессов в упругих средах с приложением к задачам ультразвукового неразрушающего контроля» (1995), А.В. Наседкина «Волновые поля в анизотропных упругих средах с усложненными свойствами и методы конечно-элементного динамического анализа» (2001), Н.В. Боева «Асимптотические методы в прямых и обратных задачах высокочастотной динамики упругих сред» (2005).

Интересен процесс, происходивший в НИИ МиПМ, – натурные эксперименты всё больше дополнялись, а порой и заменялись экспериментами на математических моделях. С первых дней существования института и по сегодняшний день успешно развивались и использовались акустико-эмиссионные методы неразрушающего контроля материалов (С.И. Буйло, А.С. Трипалин и др.). Самыми известными применениями технологий и приборов, созданных в НИИ МиПМ, стали работы по обследованию состояния российской реликвии – Царя-колокола, а также по контролю за состоянием теплозащиты космического корабля «Буран».

Однако повышение точности и достоверности получаемых результатов только совершенствованием технических характеристик приборов (излучателей сигналов и датчиков) имеет естественные непреодолимые ограничения, а расширение масштабов обследуемых объектов увеличивает стоимость эксперимента пропорционально объему объекта. Эксперименты на математической модели такими недостатками не страдают.

Параллельно с развитием экспериментальных методов неразрушающего контроля развивались методы математического моделирования акустических процессов (в частности, ультразвуковых) в упругих телах и акустических средах. В первую очередь отметим работы М.А. Сумбатяна с итальянскими коллегами и Н.В. Боева [23–25]. В последующем М.А. Сумбатяном и Н.В. Боевым была построена математическая модель переотражения акустических волн от плоских препятствий, на основе которой создан программный комплекс, позволяющий определять акустические параметры проектируемых концертных залов, храмов и т.п.

Отдельного внимания заслуживают работы академика РАН В.А. Бабешко и его учеников по математическому моделированию сейсмических процессов и виброакустике Земли, которые начались в 70-е гг. XX в. в НИИ МиПМ, где В.А. Бабешко работал заместителем директора. Затем они продолжились в Кубанском государственном университете, где В.А. Бабешко был ректором (1982–2008), а ныне заведует кафедрой математического моделирования.

В основе этих работ лежат научные результаты о колебаниях плоского штампа, лежащего на слое с переменными по толщине характеристиками, и о вибрации трещины при нагрузке, полученные молодым ученым В.А. Бабешко [26, 27]. Вот что написано на официальном сайте РАН: «Создатель нового математического метода моделирования, основанного на разработанной им теории блочного элемента, позволившего выявить новые явления, свойства, закономерности: новый тип землетрясений, «стартовых», которые можно прогнозировать, новый тип трещин в теории прочности, новые методы решения граничных задач для дифференциальных и интегральных уравнений, не поддававшихся решению аналитическими или численными методами» (<https://new.ras.ru/staff/akademiki/babeshko-vladimir-andreevich/>).

Владимир Андреевич Бабешко относится к редкому типу ученых, которые свои теоретические результаты доводят до реализации. В Кубанском университете он создал экспериментальный полигон виброакустики Земли, оборудованный мощными вибрационными установками [26].

Достижения В.А. Бабешко в области математического моделирования и механики отмечены премией Ленинского комсомола в области науки 1973 г., Государственной премией РФ в области науки и техники 2001 г. Он соавтор научного открытия «Явление высокочастотного резонанса в полуограниченных телах с неоднородностями».

Несколько особняком стоят работы Ю.А. Устинова по биомеханике. Отправляясь от своих результатов по канатам, тросам и задачам механики жидкости в цилиндрах, имеющих вертикальную анизотропию, Ю.А. Устинов перешел к задачам моделирования движения крови [28–30]. Так на кафедре теории упругости появилось научное направление – биомеханика.

Из работ последних лет отметим цикл работ по моделированию поведения оригинальных технических устройств – гофрированных мембран, обладающих высокой чувствительностью в заданном диапазоне частот (Ю.А. Устинов, И.П. Гетман, М.И. Карякин и др.) [31, 32].

Как известно, мощнейшим вычислительным инструментом при математическом моделировании задач механики в настоящее время является метод конечных элементов. Его широкому использованию способствует наличие соответствующего программного пакета ANSYS, который успешно применяется во всем мире [33]. Учебная версия этого программного пакета используется на мехмате с 1998 г.

В этом же году на кафедре математического моделирования под руководством А.В. Белоконя и А.В. Наседкина началась работа по созданию собственного программного продукта – конечно-элементного пакета ACELAN, который во многом стал следующим шагом в разработке конечно-элементных пакетов, поскольку позволял решать более широкий круг задач, в том числе по электроупругости. В настоящее время имеется уже третья версия пакета ACELAN, работающая на многопроцессорных компьютерах [34, 35].

Отдельного описания заслуживают работы по математическому моделированию, осуществленные в НИИ МиПМ, ВЦ РГУ и на мехмате РГУ по оборонной тематике. Однако специфика этих работ и требования, предъявляемые к их выполнению, не позволяют пока этого сделать.

Математическое моделирование как учебный курс в ЮФУ

Математическое моделирование как учебная дисциплина – один из самых молодых учебных курсов. Ясно, что элементы этой дисциплины на мехмате присутствовали всегда, в первую очередь в курсах дифференциальных уравнений, математической физики и в фундаментальных курсах механики (сопромат, МСС и др.).

Успешное развитие научных исследований по математическому моделированию (в том числе в РГУ (ЮФУ)) и окончательное формирование его в виде отдельной области математики неизбежно привели к мысли о необходимости разработки и реализации курса «Математическое моделирование» в виде самостоятельной учебной дисциплины, в первую очередь на отделении прикладной математики и информатики.

Инициаторами постановки такого курса выступили В.И. Юдович (зав. кафедрой вычислительной математики и математической физики), А.В. Белоконь (декан мехмата, а с 1988 г. – ректор РГУ) и Я.М. Ерусалимский (зам. декана мехмата по НИР, с 1988 г. – декан мехмата РГУ). Первые шаги в этом направлении давались нелегко – им препятствовали действовавшие учебные планы, утверждаемые Министерством высшего образования РФ, отступать от которых было запрещено, а курса математического моделирования они не содержали.

Вначале был глубокий пересмотр курса уравнений математической физики, предпринятый В.И. Юдовичем. В этом чисто математическом курсе (другое название курса «Уравнения в частных производных») впервые по существу было уделено внимание вопросам математического моделирования. Параллельно с изменением содержания курса В.И. Юдович написал и опубликовал два тома учебника «Лекции об уравнениях математической физики» [36].

Переход высшего образования от жестких учебных планов к образовательным стандартам предоставил вузам большую свободу действий. Уже в государственных стандартах первого по-

коления появился раздел «Дисциплины, устанавливаемые вузом». Воспользовавшись этим правом, мехмат РГУ решением совета факультета ввел для специальности «прикладная математика и информатика» учебный курс «Математические модели естественных наук» (ММЕН) как развитие курса «Уравнения математической физики».

Первым лектором курса ММЕН в 1991 г. стал профессор В.И. Юдович. Он прочел его студентам-прикладникам 4-го курса. Содержание ММЕН активно обсуждалось Виктором Иосифовичем с И.И. Воровичем, работавшим в то время над своим классическим трудом [37], и А.В. Белоконом, ставшим параллельным лектором по курсу ММЕН и редактором книги В.И. Юдовича по ММЕН.

Работа В.И. Юдовича над курсом ММЕН подвигла его на написание двух учебных пособий по ММЕН [38, 39], изданных уже после его смерти. Курс охватывает основы теории динамических систем и лагранжевой механики, применение этих концепций к конечномерным и бесконечномерным задачам, включая задачи механики сплошной среды и статистической механики.

Появление нового курса ММЕН естественным образом потребовало открытия на факультете и соответствующей кафедры. В 1998 г. по инициативе декана мехмата Я.М. Ерусалимского была открыта кафедра математического моделирования – первая в стране кафедра такого профиля в классическом университете.

Кафедру возглавил Александр Владимирович Белоконов, руководивший ею до своей смерти в 2013 г. Основу коллектива кафедры составили и составляют ученики А.В. Белоконов – А.В. Наседкин (заведует кафедрой с 2013 г.) и А.С. Скалиух, ученик В.И. Юдовича – К.А. Надолин, ученица Ю.А. Устинова – Н.В. Курбатова. Много лет работает на кафедре по совместительству и ученик А.В. Белоконов А.Н. Соловьев. Основным учебным курсом кафедры стал курс ММЕН, а также магистерский курс «Современные проблемы прикладной математики и информатики».

О работе кафедры по созданию конечно-элементного пакета ACELAN мы уже писали выше. Кафедра была головной по выполнению большого международного проекта «Научно-образовательный эколого-аналитический центр системных исследований, математического моделирования и геоэкологической безопасности Юга России», в работе которого участвовали не только сотрудники кафедры, но и академики РАН В.А. Бабешко и В.И. Минкин (РГУ), доктор наук, лауреат Госпремии РФ О.Д. Пряхина (КубГУ). На базе кафедры существовала и межвузовская корпоративная кафедра математического моделирования (от РГУ – А.В. Белоконов, ТРТУ – А.И. Сухинов, НИИ – А.Н. Ткачев).

Популяризации математического моделирования, особенно имитационного, способствовала книга А.Б. Горстко [40].

Отражением развития в РГУ математического моделирования не только как научного, но и нового направления в системе математического образования, стало включение главы «Математическое моделирование» в учебник для вузов [41]. Он стал победителем конкурса учебников нового поколения Министерства образования России, проведенного в 1988 г., и рекомендован для студентов естественно-научных направлений и специальностей. В 2022 г. вышло его 4-е издание.

Ежегодно проводятся всероссийские конференции, посвященные проблемам математического моделирования: «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования» (с 1973 г.) и «Биомеханика в современном университете» (с 2005 г.). Действует диссертационный совет ЮФУ по защите докторских и кандидатских диссертаций по специальности «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (председатель А.В. Наседкин).

В этом небольшом очерке истории развития математического моделирования в ЮФУ (РГУ) мы ограничились только тремя его подразделениями – мехматом РГУ (ЮФУ), НИИ МиПМ, ВЦ РГУ (ЮФУ). В прошлые годы они составляли учебно-научный комплекс РГУ по математике и механике. После преобразования в 2007 г. РГУ в ЮФУ (присоединением к нему ТРТУ, РГПУ и Ростовского архитектурного института) они с 2009 г. объединены в крупное структурное подразделение – Институт математики, механики и компьютерных наук ЮФУ им. академика РАН И.И. Воровича. Об истории развития математического моделирования в других подразделениях ЮФУ, в частности в ТРТУ, ещё предстоит написать.

Список источников

1. Маслов В. П., Мясников В.П., Данилов В.Г. Математическое моделирование аварийного блока Чернобыльской АЭС. М.: Наука, 1987. 142 с.
2. Ворович И.И., Юдович В.И. Удар круглого диска о жидкость конечной глубины // ПММ. 1957. Т. 21, № 4. С. 525–532.
3. Ворович И.И., Сафронов Ю.В., Устинов Ю.А. Прочность колес сложной конструкции. М.: Машиностроение, 1967. 195 с.
4. Зарипов Р.Х. Кибернетика и музыка. М.: URSS: Либроком, 2014. 232 с.
5. Симоненко И.Б., Захарюта В.П., Юдович В.И. Метод точечных зарядов для расчета емкостей // Изв. вузов. Электромеханика. 1964. № 11. С. 1305–1310.
6. Симоненко И.Б., Захарюта В.П., Юдович В.И. Приближенный метод вычисления емкостей систем проводников, расположенных на диэлектрическом слое // Изв. вузов. Электромеханика. 1965. № 3. С. 247–253.
7. Перминов А.В., Любимова Т.П. Устойчивость термовибрационной конвекции псевдопластической жидкости в плоском вертикальном слое // Вычисл. механика сплошных сред. 2017. Т. 10, № 1. С. 78–89.
8. Зеньковская С.М., Симоненко И.Б. О влиянии вибраций высокой частоты на возникновение конвекции // МЖГ. 1966. № 5. С. 51–55.
9. Иванов А.И. Экспериментальные исследования конвективных процессов в газовых и сверхкритических средах на орбитальном комплексе «Мир»: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2003. 26 с.
10. Жуков М.Ю., Юдович В.И. Математическая модель изотахофореза // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267, № 2. С. 334–343.
11. Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Юдович В.И. Математическая теория электрофореза: применение к методам фракционирования биополимеров. Киев: Наукова думка, 1983. 202 с.
12. Жуков М.Ю. Массоперенос электрическим полем. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 2005. 216 с.
13. Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Юдович В.И. Оценка перспективности различных методов электрофореза для космической биотехнологии // Тез. докл. II Всесоюз. сем. по гидродинамике и теплообмену в невесомости. Пермь, 1981. С. 140–141.
14. Жуков М.Ю., Бабский В.Г., Сазонов Л.И., Стоянов А.В. Теоретический анализ процесса изоэлектрофокусирования белков на установке «Каштан» // Космическая наука и техника. 1989. Т. 4. С. 15–19.
15. Жуков М.Ю., Сазонов Л.И., Цывенкова О.А. Влияние гравитации на форму зон при электрофорезе // Тез. докл. IV Всесоюз. сем. по гидродинамике и теплообмену в невесомости. Новосибирск, 1987. С. 107–108.
16. Сурков Ф.А. Академик И.И. Ворович – инициатор и соруководитель работы по созданию имитационной модели экосистемы Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2020. Т. 1, № 5. С. 11–14.
17. Ворович И.И., Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Жданов Ю.А., Сурков Ф.А. Использование математической модели экосистемы Азовского моря для исследования закономерностей функционирования и структуры системы // Докл. АН СССР. 1981. Т. 259, № 2. С. 302–306.
18. Ворович И.И., Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Жданов Ю.А., Сурков Ф.А. Общая характеристика и описание имитационной модели Азовского моря // Докл. АН СССР. 1981. Т. 259, № 5. С. 1052–1056.
19. Жданов Ю.А., Ворович И.И., Горстко А.Б. Имитационная модель экосистемы Азовского моря. Разработка и использование // Изв. СКНЦ ВШ. Естеств. науки. 1981. № 2. С. 7.
20. Ворович И.И., Домбровский Ю.А., Жданов Ю.А., Обущенко Н.И., Сурков Ф.А. Имитационное моделирование динамики численности рыбных популяций Азовского моря // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289, № 4. С. 809–812.
21. Сурков Ф.А., Крукиер Л.А., Муратова Г.В. Численное моделирование динамики Азовского моря при сужении гирла Таганрогского залива // Морской гидрофиз. журн. 1989. № 6. С. 55–62.
22. Гетман И.П., Устинов Ю.А. Математическая теория нерегулярных твердых волноводов. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1993. 143 с.
23. Scarpetta E., Sumbatyan M.A. In-Plane Wave Propagation Through Elastic Solids with a Periodic Array of Rectangular Defects // J. of Applied Mechanics ASME. 2002. Vol. 69, № 2. P. 179–188.
24. Ciarletta M., Alexandrov V.M., Sumbatyan M.A. Low-Frequency Penetration of a Plane Elastic Wave Through the Periodic Array of Interface Cracks // Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik. 2002. Vol. 82, № 2. S. 137–141.
25. Боев Н.В., Сумбатян М.А. Коротковолновая дифракция на телах, ограниченных произвольной гладкой поверхностью // Докл. РАН. 2003. Т. 392, № 5. С. 614–617.
26. Ананьев И.В., Бабешко В.А. Колебания штампа на слое с переменными по глубине характеристиками // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1978. № 1. С. 64.
27. Бабешко В.А., Ткачев Г.В. Вибрация круглой трещины при трехкомпонентной нагрузке // ПММ. 1980. Т. 44, № 5. С. 857.

28. Устинов Ю.А., Богаченко С.Е. Модель движения крови в артериальном сосуде во время систолы и анализ напряженного состояния стенки с учетом винтовой анизотропии // Рос. журн. биомеханики. 2008. Т. 13, № 1. С. 29–42.
29. Батищев В.А., Устинов Ю.А. Спиральные волны в кровеносных сосудах // Экол. вестн. науч. центров Черноморского экономического сотрудничества. 2012. Т. 9, № 3. С. 18–23.
30. Батищев В.А., Петровская Н.В., Устинов Ю.А. Моделирование спиральных волн в аорте // Рос. журн. биомеханики. 2013. Т. 17, № 1. С. 55–63.
31. Karyakin M., Pustovalova O., Ustinov Y. Mathematical modelling of circular corrugated membranes // Proceedings of the 2018 5th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry. 2018. P. 68–71.
32. Karyakin M.I., Ustinov Y.A. Mathematical Modelling and Design of Isolation Diaphragms for Pressure Gauges // J. of Physics: Conference Series. Theory and Applications. Dynamic Systems and Computer Science: Theory and Applications, DYSC 2020. 2021. P. 012038.
33. Белоконь А.В., Наседкин А.В. Моделирование пьезоизлучателей ультразвуковых волн с использованием программного комплекса ANSYS // Изв. ТРТУ. 1998. № 4 (10). С. 147–150.
34. Белоконь А.В., Наседкин А.В. Расчет некоторых типов задач термоупругости с использованием пакетов ANSYS и AСЕLAN // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2004. № 13. С. 52–56.
35. Белоконь А.В. О моделировании пьезоэлектрических устройств в конечно-элементном пакете AСЕLAN // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4–5. С. 2007–2009.
36. Юдович В.И. Лекции об уравнениях математической физики. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1998. Ч. 1. 240 с.; 1999. Ч. 2. 255 с.
37. Ворович И.И. Лекции по динамике Ньютона. Современный взгляд на механику Ньютона: в 2 ч. М.: Физматлит, 2004. Ч. 1. 680 с.; 2010. Ч. 2. 604 с.
38. Юдович В.И. Математические модели естествознания: курс лекций. М.: Вузовская книга, 2009. 288 с.
39. Юдович В.И. Математические модели естественных наук: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2011. 335 с.
40. Горстко А.Б. Познакомьтесь с математическим моделированием. М.: Знание, 1991. 156 с.
41. Горстко А.Б., Владимирский Б.М., Ерусалимский Я.М. Математика. Общий курс: учебник. 4-е изд. СПб.: Лань, 2022. 960 с.

References

1. Maslov V.P., Myasnikov V.P., Danilov V.G. *Mathematical modeling of the emergency unit of the Chernobyl NPP*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. 142 p. (In Russ.).
2. Vorovich I.I., Yudovich V.I. Impact of a round disk on a liquid of infinite depth. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1957;21(4):525-532. (In Russ.).
3. Vorovich I.I., Safronov Yu.V., Ustinov Yu.A. *Strength of wheels of complex construction*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1967. 195 p. (In Russ.).
4. Zaripov R.Kh. *Cybernetics and music*. Moscow: URSS: Librokom Publ.; 2014. 232 p. (In Russ.).
5. Simonenko I.B., Zakharyuta V.P., Yudovich V.I. The method of point series for calculating capacities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*. 1964;(11):1305-1310. (In Russ.).
6. Simonenko I.B., Zakharyuta V.P., Yudovich V.I. Approximate method for calculating capacitances of conductor systems located on a dielectric layer. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*. 1965;(3):247-253. (In Russ.).
7. Perminov A.V., Lyubimova T.P. Stability of thermovibration convection of a pseudoplastic liquid in a flat vertical layer. *Vychisl. mekhanika sploshnykh sred = Computational Continuum Mechanics*. 2017;10(1):78-89. (In Russ.).
8. Zenkovskaya S.M., Simonenko I.B. On the influence of high-frequency vibrations on the occurrence of convection. *MZhG = Fluid Dynamics*. 1966;(5):51-55. (In Russ.).
9. Ivanov A.I. *Experimental studies of convective processes in gas and supercritical media on the orbital complex "Mir"*. Dissertation Thesis. Moscow, 2003. 26 p. (In Russ.).
10. Zhukov M.Yu., Yudovich V.I. Mathematical model of isotachophoresis. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1982;267(2):334-343. (In Russ.).
11. Babsky V.G., Zhukov M.Yu., Yudovich V.I. *Mathematical theory of electrophoresis: Application to methods of biofield fractionation*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1983. 202 p. (In Russ.).
12. Zhukov M.Yu. *Mass transfer by electric field*. Rostov-on-Don: Rostov State University Press; 2005. 216 p. (In Russ.).
13. Babsky V.G., Zhukov M.Yu., Yudovich V.I. Evaluation of the prospects of various electrophoresis methods for space biotechnology. *Abstracts of the II All-Union Seminar on hydrodynamics and heat and mass transfer in zero gravity*. Perm, 1981:140-141. (In Russ.).

14. Zhukov M.Yu., Babsky V.G., Sazonov L.I., Stoyanov A.V. Theoretical analysis of the protein isoelectro-focusing process at the plant "Kashtan". *Kosmicheskaya nauka i tekhnika = Space Science and Technology*. 1989;4:15-19. (In Russ.).
15. Zhukov M.Yu., Sazonov L.I., Tsyvenkova O.A. Influence of gravity on the shape of zones during electro-phoresis. *Abstracts of the IV All-Union Seminar on hydrodynamics and heat and mass transfer in zero gravity*. Novosibirsk, 1987:107-108. (In Russ.).
16. Surkov F.A. Academician I.I. Vorovich - initiator and co-director of the work on the creation of an imitation model of the ecosystem of the Azov Sea. *Ecology. Economy. Computer Science. System analysis and modeling of economic and ecological systems*. 2020;1(5):11-14. (In Russ.).
17. Vorovich I.I., Gorstko A.B., Dombrovsky Yu.A., Zhdanov Yu.A., Surkov F.A. Using a mathematical model of the ecosystem of the Sea of Azov to study the patterns of functioning and structure of the system. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1981;259(2):302-306. (In Russ.).
18. Vorovich I.I., Gorstko A.B., Dombrovsky Yu.A., Zhdanov Yu.A., Surkov F.A. General characteristics and description of the imitation model of the Azov Sea. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1981;259(5):1052-1056. (In Russ.).
19. Zhdanov Yu.A., Vorovich I.I., Gorstko A.B. Simulation model of the ecosystem of the Azov Sea. Development and use. *Izv. SKNTs VSh. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 1981;(2):7. (In Russ.).
20. Vorovich I.I., Dombrovsky Yu.A., Zhdanov Yu.A., Obushchenko N.I., Surkov F.A. Simulation modeling of the dynamics of the number of fish populations of the Azov Sea. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1986;289(4):809-812. (In Russ.).
21. Surkov F.A., Krukier L.A., Muratova G.V. Numerical modeling of the dynamics of the Azov Sea during the narrowing of the Taganrog girth. *Morskoi gidrofiz. zhurn. = Marine Hydrophysical Journal*. 1989;(6):55-62. (In Russ.).
22. Hetman I.P., Ustinov Yu.A. *Mathematical theory of irregular solid waveguides*. Rostov-on-Don: Rostov State University Press; 1993. 143 p. (In Russ.).
23. Scarpetta E., Sumbatyan M.A. In-Plane Wave Propagation Through Elastic Solids with a Periodic Array of Rectangular Defects. *Journal of Applied Mechanics ASME*. 2002;69(2):179-188.
24. Ciarletta M., Alexandrov V.M., Sumbatyan M.A. Low-Frequency Penetration of a Plane Elastic Wave Through the Periodic Array of Interface Cracks. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2002;82(2):137-141.
25. Boev N.V., Sumbatyan M.A. Short-wave diffraction on bodies bounded by an arbitrary smooth surface. *Doklady RAN = Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2003;392(5):614-617. (In Russ.).
26. Ananyev I.V., Babeshko V.A. Stamp vibrations on a layer with variable depth characteristics. *Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela = Mechanics of Solids*. 1978;(1):64. (In Russ.).
27. Babeshko V.A., Tkachev G.V. Vibration of a circular crack under a three-component load. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1980;44(5):857. (In Russ.).
28. Ustinov Yu.A., Bogachenko S.E. Model of blood flow in an arterial vessel during systole and analysis of the stress state of the wall taking into account helical anisotropy. *Ros. zhurn. biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2008;13(1):29-42. (In Russ.).
29. Batishchev V.A., Ustinov Yu.A. Spiral waves in blood vessels. *Ekol. vestn. nauch. tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of the scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2012;9(3):18-23. (In Russ.).
30. Batishchev V.A., Petrovskaya N.V., Ustinov Yu.A. Modeling of spiral waves in the aorta. *Ros. zhurn. biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2013;17(1):55-63. (In Russ.).
31. Karyakin M., Pustovalova O., Ustinov Y. Mathematical modelling of circular corrugated membranes. *Proceedings of the 2018 5th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry*. 2018:68-71.
32. Karyakin M.I., Ustinov Y.A. Mathematical Modelling and Design of Isolation Diaphragms for Pressure Gauges. *Journal of Physics: Conference Series. Theory and Applications. Dynamic Systems and Computer Science: Theory and Applications, DYSC 2020*. 2021:012038.
33. Belokon A.V., Nasedkin A.V. Modeling of piezoelectric emitters of ultrasonic waves using the ANSYS software package. *Izvestiya TRTU = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 1998;(4):147-150. (In Russ.).
34. Belokon A.V., Nasedkin A.V. Calculation of some types of thermoelasticity problems using ANSYS and ACELAN packages. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2004;(S13):52-56. (In Russ.).
35. Belokon A.V. On modeling piezoelectric devices in the ACELAN finite element package. *Vestn. NNGU im. N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;(4-5):2007-2009. (In Russ.).

36. Yudovich V.I. *Lectures on equations of mathematical physics*. Rostov-on-Don: Rostov State University Press; 1998. Ch. 1. 240 p.; 1999. Ch. 2. 255 p. (In Russ.).

37. Vorovich I.I. *Lectures on Newton's dynamics. A modern view of Newton's mechanics*: in 2 ch. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2004. Ch. 1. 680 p.; 2010. Ch. 2. 604 p. (In Russ.).

38. Yudovich V.I. *Mathematical models of natural science*. Course of lectures. Moscow: Vuzovskaya kniga Publ.; 2009. 288 p. (In Russ.).

39. Yudovich V.I. *Mathematical models of natural sciences*: a textbook. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2011. 335 p. (In Russ.).

40. Gorstko A.B. *Get acquainted with mathematical modeling*. Moscow: Znanie Publ.; 1991. 156 p. (In Russ.).

41. Gorstko A.B., Vladimirsky B.M., Erusalimskiy I.M. *Mathematics. General course*: Textbook. 4th ed. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2022. 960 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Я.М. Ерусалимский – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры алгебры и дискретной математики.

И.А. Шкурай – ассистент кафедры теории и методологии математического образования.

Information about the authors

I.M. Erusalimskiy - Doctor of Science (Technical), Professor, Professor of the Department of Algebra and Discrete Mathematics.

I.A. Shkuray - Assistant at the Department of Theory and Methodology of Mathematical Education.

*Статья поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 25.01.2024; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 15.01.2024; approved after reviewing 25.01.2024; accepted for publication 19.02.2024.*

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 519.2

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-17-21

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КРЕДИТНОГО ПОРТФЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЁТКО-МНОЖЕСТВЕННОГО ПОДХОДА

Ирина Александровна Землякова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

izemlyakova@sfedu.ru

Аннотация. Рассматривается проблема максимизации прибыли от кредитования финансовой организации. Набор кредитных контрактов формирует кредитный портфель, что позволяет использовать портфельную теорию при исследовании обозначенной проблемы. При формировании кредитного портфеля как инвестиционно возникает задача перераспределения средств инвестиционного портфеля в целях минимизации его возможного риска и максимизации доходности.

Данная задача в классической постановке может быть решена с помощью диверсификации риска по Марковицу.

Таким образом, задача минимизации риска и максимизации доходности от кредитования финансовой организации может быть представлена в виде задачи нечёткого линейного программирования. Она решается применением дискретных α -уровней и сводится к набору задач линейного программирования, построенных для каждого из них.

Чёткое ожидаемое оптимальное решение может быть получено с помощью применения метода дефаззификации, позволяющего преобразовывать нечёткое множество в чёткое число.

Ключевые слова: кредитный портфель, риск, диверсификация риска по Марковицу, нечёткое множество, нечёткое число, задача нечёткого математического программирования, задача нечёткого линейного программирования, дискретные α -уровни, метод дефаззификации

Для цитирования: Землякова И.А. Формирование оптимального кредитного портфеля с использованием нечётко-множественного подхода // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 17–21.

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

Original article

FORMATION OF AN OPTIMAL LOAN PORTFOLIO USING A FUZZY-MULTIPLE APPROACH

Irina A. Zemlyakova

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

izemlyakova@sfedu.ru

© Землякова И.А., 2024

Abstract. The problem of profit maximization from lending to a financial organization is considered. A set of loan contracts forms a loan portfolio, which makes it possible to use the portfolio theory in the study of the designated problem. We will consider the formation of a loan portfolio as the formation of an investment portfolio. The problem arises of redistributing the funds of the investment portfolio in order to minimize its possible risk and maximize profitability.

This problem in classical formulation can be solved according to Markowitz risk diversification.

Thus, the problem of risk minimization and profitability maximization from lending to a financial institution can be represented as a fuzzy mathematical programming problem, and more specifically, as a fuzzy linear programming problem. The resulting problem is solved by considering discrete α -levels and is reduced to a set of linear programming problems constructed for each of them.

A clear expected optimal solution can be obtained by applying the defuzzification method, which allows you to convert a fuzzy set into a crisp number.

Keywords: credit portfolio, risk, Markowitz risk diversification, fuzzy set, fuzzy number, fuzzy mathematical programming problem, fuzzy linear programming problem, discrete α -levels, defuzzification method

For citation: Zemlyakova I.A. Formation of an Optimal Loan Portfolio Using a Fuzzy-Multiple Approach. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):17-21. (In Russ.).

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

Введение

Максимизация прибыли от кредитования финансовой организации может быть достигнута путём увеличения процентного дохода, связанного с кредитным портфелем. Здесь можно применить стратегию, расширяющую список функционирующих контрактов по распределению средств кредитования, но возможно возникновение проблемы, увеличивающей кредитный риск. Он возникает в связи с вероятным банкротством заёмщика или риском процентной ставки. Таким образом, появляется решение, связанное не с расширением кредитного портфеля, а с перераспределением средств.

Формирование кредитного портфеля будем рассматривать как формирование инвестиционного портфеля, для которого возникает задача минимизации риска. В своей классической постановке она может быть решена с помощью диверсификации риска по Г. Марковицу [1].

Однако данный подход к управлению рисками показал свою несостоятельность из-за существенной неопределённости в функционировании финансовых систем. Она возникает в связи с действиями внешней среды, работой финансовых менеджеров и не обладает статистической природой.

Альтернативным подходом, нацеленным на решение возникшей проблемы, является использование нечётких множеств, которые позволяют прогнозировать будущие значения параметров, меняющиеся в некотором диапазоне. Нечёткие числа позволяют решить такие вопросы, как неуверенность финансового аналитика в оценке, планирование сценариев с затруднением при выборе будущей оценки.

В данной статье рассматривается задача максимизации прибыли от кредитования финансовой организации в контексте нечётко-множественного подхода.

Классическая постановка задачи

Пусть $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ – множество активов кредитного портфеля; $P_i(t)$ – процентный доход актива i , $i = 1, \dots, n$, в момент времени t , $t = 1, \dots, T$, тогда доходность актива за i -й промежуток времени определим как $r_i(t) = \frac{P_i(t+1) - P_i(t)}{P_i(t)}$ [1].

Рассмотрим вероятностное пространство (Ω, F, P) . Каждый актив $A_i, i = 1, \dots, n$, опишем с помощью случайной величины $r_i, i = 1, \dots, n$. Каждой траектории ω поставим в соответствие вероятность данного исхода $p(\omega)$. Для заданных случайных величин определим математическое ожидание μ_i , дисперсию $\sigma_i^2 = E(r_i - \mu_i)^2$ и ковариацию между i -м и j -м активами $cov(r_i, r_j)$ [2].

При решении практических задач вместо рассматриваемых теоретических характеристик случайных величин r_i будем использовать их эмпирические аналоги: $\hat{\mu}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T r_i(t)$, $\hat{\sigma}_i^2 = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (r_i(t) - \hat{\mu}_i)^2$.

Всякий портфель характеризуется его математическим ожиданием $\mu_x = E \sum_{i=1}^n x_i r_i = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i$, представляющим собой ожидаемую среднюю доходность, и дисперсией $\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \sigma_{ij}$, соответствующей уровню риска. Обозначим элемент ковариационной матрицы как $\sigma_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (r_{ij} - \mu_i)(r_{kj} - \mu_k)$, $i, k = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$. Очевидно, что уровень риска следует минимизировать, что позволит получить целевую функцию будущей задачи. Так как прибыль от кредитования финансовой организации должна быть увеличена, то от средней доходности потребуем, чтобы она была не меньше некоторого заранее заданного числа m .

Пусть x_i – доля i -го актива в портфеле. Данная величина, согласно кредитной стратегии банка, может принимать лишь определённые значения из промежутка $[x_i^l; x_i^r]$, что даст дополнительные ограничения в задаче [3].

Таким образом, получили следующую задачу:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \sigma_{ij} \rightarrow \min, \\ \mu_x &= \sum_{i=1}^n x_i \mu_i \geq m, \\ \sum_{i=1}^n x_i &= 1, \\ x_i^l &\leq x_i \leq x_i^r, i = 1, \dots, n, \\ x_i &> 0, i = 1, \dots, n, \end{aligned} \tag{1}$$

где m – ожидаемая доходность портфеля.

Цель данной задачи – отыскание условного экстремума функции нескольких переменных, что достаточно просто решается путём определения экстремума функции Лагранжа. Решением является вектор $x_i, 1, \dots, n$, где x_i – доля i -го актива в оптимальном кредитном портфеле.

Мы же, в связи с описанной во введении проблемой, перейдём от классической постановки задачи к более актуальной, основанной на применении нечётко-множественного подхода. Для этого введём в рассмотрение основные необходимые понятия теории нечётких множеств.

Основные понятия теории нечётких множеств

В связи с существенной неопределённостью на финансовых рынках сценарно-вероятностные методы анализа рисков постепенно себя изживают и уступают место нечётко-множественным подходам. Основа данной теории была заложена в работе Л. Заде [4].

Так, множество A в классической теории множеств может быть задано с помощью характеристической функции (функции принадлежности) на универсальном множестве $\mu(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in A \\ 0, & \text{если } x \notin A \end{cases}$

Рассмотрим нечёткое множество \tilde{B} . Его характеристическая функция принимает значения на отрезке $[0, 1]$. То есть эксперт устанавливает степень, с которой число принадлежит множеству \tilde{B} . Если $\mu(x) = 0$, то с полной уверенностью можно сказать, что $x \notin \tilde{B}$; если $\mu(x) = 1 - x \in \tilde{B}$. Если $\mu(x) > 0,5$, то эксперт склонен отнести элемент x к множеству \tilde{B} . Нечётким множеством назовём пару $(\tilde{A}, \mu_{\tilde{A}})$ [5], множеством уровня α (α -срезом) нечёткого множества \tilde{B} – чёткое подмножество универсального множества, такое, что $B_\alpha = \{x | \mu(x) \geq \alpha\}, \alpha \in [0, 1]$.

Носителем нечёткого множества \tilde{B} назовём подмножество B , содержащее элементы универсального множества, для которых значение функции принадлежности больше нуля.

Нечёткие числа представляют собой подмножества нечётких множеств. Нечёткие числа удобно задавать с помощью доверительных интервалов, где левая граница является худшим значением параметра, правая – лучшим. Достаточно часто используют нечёткие треугольные числа $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$, т.е. эксперты утверждают, что значение величины не может быть меньше a_1 , больше a_3 . Вероятнее всего, что значение рассматриваемой величины примет значение a_2 . Мы

будем рассматривать нечёткие числа в менее распространённой, но более удобной с точки зрения текущего исследования форме, функция принадлежности будет относиться к гауссову типу:

$$\tilde{\mu}(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right),$$

где c – центр нечёткого множества; σ – крутизна функции. Использование функции принадлежности данного типа позволяет рассматривать неизвестные параметры, описываемые нечёткими числами, как непрерывные величины. Причём часть значений, расположенных ближе к центру, имеют большую вероятность, а среднему значению соответствует наибольшее значение вероятности (рисунок).

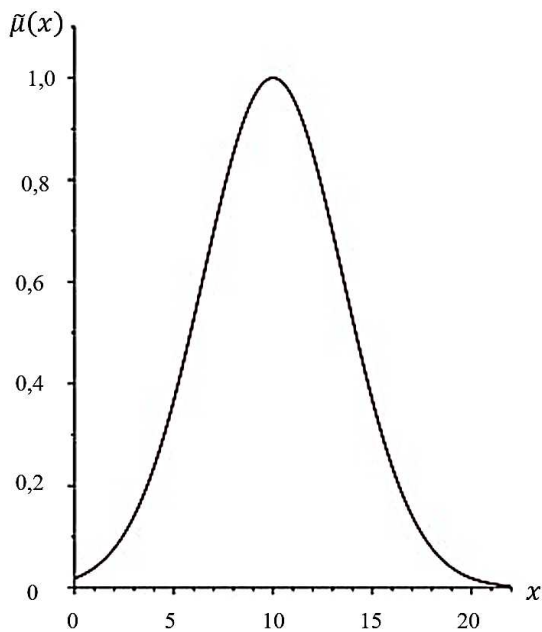


График функции принадлежности гауссова типа при $c = 10, \sigma = 5$ / Graph of Gaussian type membership function at $c = 10, \sigma = 5$

Постановка задачи

Задача формирования кредитного портфеля наименьшего риска в контексте нечётко-множественного подхода базируется на предположении о том, что доходности $\tilde{\mu}_i, i = 1, \dots, n$, являются нечёткими числами. Получили вектор $(\tilde{\mu}_1, \tilde{\mu}_2, \dots, \tilde{\mu}_n)$, состоящий из нечётких чисел с функциями принадлежности гауссова типа. Ожидаемая доходность портфеля t также является нечётким числом и будет записана как \tilde{m} . Будем требовать, чтобы средняя доходность была не хуже, чем \tilde{m} .

Перепишем классическую задачу диверсификации риска (1), используя нечёткие доходности:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_x^2 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \tilde{\sigma}_{ij} \rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^n x_i \tilde{\mu}_i &> \tilde{m}, \\ \sum_{i=1}^n x_i &= 1, \\ x_i^l &\leq x_i \leq x_i^r, i = 1, \dots, n, \\ x_i &> 0, i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (2)$$

Получили задачу нечёткого математического программирования с нечёткими целевой функцией и ограничениями. Причём решение данной задачи должно быть чётким и представлено в виде вектора x .

Согласно теории нечётких множеств, можно интерпретировать знак «не хуже» как «содержится в» и переписать ограничение задачи (2) в виде $\sum_{i=1}^n x_i \tilde{\mu}_i \subseteq \tilde{m}$.

Для решения полученной задачи нечёткого линейного программирования определим границы носителя нечёткого коэффициента целевой функции $\tilde{\sigma}_{ij} \in [l, r]$, где l – левая граница носителя, r – правая. Далее воспользуемся подходом, основанным на использовании дискретных α -уровней [6].

Введём в рассмотрение набор уровней $\alpha_k, k = 1, \dots, K$. На каждом ищем минимум целевой функции: $\sigma_k^2 = \sigma_k^l(\alpha_k, x) + \sigma_k^r(\alpha_k, x) \rightarrow \min$.

Это позволит переписать нечёткую целевую функцию задачи нечёткого линейного программирования (2) в виде

$$\sigma_x^2 = \sum_{k=1}^K (\sigma_k^l(\alpha_k, x) + \sigma_k^r(\alpha_k, x)) \alpha_k \rightarrow \min.$$

Таким образом, целевая функция задачи (2) представляет собой чёткую функцию цели. Аналогично ограничения задачи (2) для каждого α_k -уровня имеют вид $\sum_{i=1}^n [\mu_i^l(\alpha_k); \mu_i^r(\alpha_k)] x_i \subseteq [m^l(\alpha_k); m^r(\alpha_k)], \sum_{i=1}^n x_i = 1, x_i^l \leq x_i \leq x_i^r, i = 1, \dots, n, x_i > 0, i = 1, \dots, n$.

Запишем первое ограничение в виде системы линейных неравенств

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \mu_i^l(\alpha_k) x_i \geq m^l(\alpha_k), \\ \sum_{i=1}^n \mu_i^r(\alpha_k) x_i \leq m^r(\alpha_k). \end{cases}$$

Таким образом, для каждого α_k -уровня была получена задача линейного программирования вида $\sigma_x^2 = \sum_{k=1}^K (\sigma_k^l(\alpha_k, x) + \sigma_k^r(\alpha_k, x)) \alpha_k \rightarrow \min, \sum_{i=1}^n \mu_i^l(\alpha_k) x_i \geq m^l(\alpha_k), \sum_{i=1}^n \mu_i^r(\alpha_k) x_i \leq m^r(\alpha_k), \sum_{i=1}^n x_i = 1, x_i^l \leq x_i \leq x_i^r, i = 1, \dots, n, x_i > 0, i = 1, \dots, n.$

Чёткое ожидаемое оптимальное решение, выраженное в виде вектора \mathbf{x}_1 , можно получить, используя метод дефаззификации. Данный метод позволяет преобразовывать нечёткое множество в чёткое число.

Заключение

В статье рассмотрена задача максимизации доходности и минимизации риска кредитного портфеля. Принято решение отказаться от классического метода диверсификации риска по Марковицу вследствие значительной неопределённости функционирования финансовых систем. Поиск решения осуществлялся в контексте нечётко-множественного подхода в предположении, что доходности являются нечёткими числами. Это позволило свести проблему к задаче нечёткого линейного программирования. С помощью рассмотрения дискретных α -уровней она сведена к набору задач линейного программирования. Для получения чёткого решения изначальной задачи к полученному решению был применён метод дефаззификации.

Список источников

1. Markowitz H. Portfolio selection // Journal of Finance. 1952. Vol. 7, № 1. P. 77–91.
2. Мельников А.В., Попова Н.В., Скорнякова В.С. Математические методы финансового анализа. М.: Анкил, 2006. 440 с.
3. Калугина Т.О. Применение портфельной теории Марковица при формировании оптимального кредитного портфеля // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд. 2014. № 30. С. 167–171.
4. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, № 3. P. 338–353.
5. Коньшева Л.А., Серова Т.А. Элементы теории нечётких множеств: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2007. 129 с.
6. Яхьяева Г.Э. Нечёткие множества и нейронные сети: учеб. пособие. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2012. 316 с.

References

1. Markowitz H. Portfolio selection. *Journal of Finance*. 1952;7(1):77-91.
2. Melnikov A.V., Popova N.V., Skornyakova V.S. *Mathematical methods of financial analysis*. Moscow: Ankil Publ.; 2006. 440 p. (In Russ.).
3. Kalugina T.O. Application of Markowitz's portfolio theory in the formation of an optimal loan portfolio. *Sovremennye tendentsii v ekonomike i upravlenii: novyy vzglyad = Modern Tendencies the Economics and Management: a New Look*. 2014;(30):167-171. (In Russ.).
4. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965;8(3):338-353.
5. Konyshcheva L.A., Serova T.A. *Elements of the theory of fuzzy sets: textbook*. Yekaterinburg: Russian State Vocational Pedagogical University Press; 2007. 129 p. (In Russ.).
6. Yakhyayeva G.E. *Fuzzy sets and neural networks: textbook*. Moscow: BINOM, Laboratoriya znaniy Publ.; 2012. 316 p. (In Russ.).

Информация об авторе

И.А. Землякова – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the author

I.A. Zemlyakova - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Operations Research, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

Статья поступила в редакцию 26.07.2023; одобрена после рецензирования 10.08.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 26.07.2023; approved after reviewing 24.09.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья

УДК 519.634

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-22-29

СХЛОПЫВАНИЕ ПРИСОЕДИНЕННОЙ КАВЕРНЫ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ ФРУДА ПОСЛЕ ОТРЫВНОГО УДАРА ПЛАВАЮЩЕГО ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА

Михаил Викторович Норкин

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
norkinmi@mail.ru

Аннотация. Рассматривается плоская задача о схлопывании присоединенной каверны, образованной в результате отрывного удара эллиптического цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости. Предполагается, что после удара цилиндр движется в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. При малых числах Фруда, которые соответствуют небольшим скоростям движения цилиндра, возмущения свободных границ жидкости будут незначительными, и процесс схлопывания каверны в основном сводится к изучению динамики точек отрыва. Решение данной задачи строится при помощи асимптотических разложений по малому параметру, которым является число Фруда. В главном асимптотическом приближении формулируется смешанная краевая задача теории потенциала с односторонними ограничениями на поверхности тела. На ее основе определяется динамика точек отрыва, форма тонкой каверны и реакция среды на тело. Полученные результаты могут быть использованы для решения практических задач морской и корабельной гидродинамики.

Ключевые слова: идеальная несжимаемая жидкость, эллиптический цилиндр, отрывной удар, схлопывание присоединенной каверны, асимптотика, динамика точек отрыва, число Фруда, число кавитации

Для цитирования: Норкин М.В. Схлопывание присоединенной каверны при малых числах Фруда после отрывного удара плавающего эллиптического цилиндра // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 22–29.

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

Original article

COLLAPSE OF THE ATTACHED CAVITY AT LOW FROUDE NUMBERS AFTER A SEPARATION IMPACT OF A FLOATING ELLIPTICAL CYLINDER

Mikhail V. Norkin

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
norkinmi@mail.ru

Abstract. The plane problem of the collapse of an attached cavity formed as a result of a separation impact of an elliptical cylinder under the free surface of a heavy fluid is considered. It is assumed that after the impact the cylinder moves horizontally with constant velocity. At small Froude numbers, which correspond to small velocities of the cylinder, the free boundaries of the liquid are slightly perturbed and the process of cavity col-

© Норкин М.В., 2024

lapse is mainly reduced to the study of dynamics of breakaway points. The solution to this problem is constructed using asymptotic decompositions on a small parameter, which is the Froude number. In the main asymptotic approximation, the mixed boundary value problem of potential theory with one-sided restrictions on the body surface is formulated. On its basis, the dynamics of detachment points, the shape of a thin cavities, and the reaction of the environment to the body are determined. The results obtained can be used for solving practical problems of marine and ship hydrodynamics.

Keywords: *ideal incompressible fluid, elliptical cylinder, separation impact, collapse of the attached cavity, asymptotics, dynamics of separation points, Froude number, cavitation number*

For citation: Norkin M.V. Collapse of the Attached Cavity at Low Froude Numbers after a Separation Impact of a Floating Elliptical Cylinder. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):22-29. (In Russ.).

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

Введение

Проблема взаимодействия твердых тел с жидкостью с учетом явления кавитации относится к числу важных задач современной гидродинамики. Среди актуальных направлений исследования отметим задачи об отрывном ударе тел, плавающих на поверхности жидкости или полностью в нее погруженных [1–5]; задачи проникания тел в жидкость с учетом отрыва частиц жидкости от их поверхностей [6]; задачи подводного старта ракет кавитационным способом [7]; экспериментальное изучение ударного воздействия жидкости на твердые стенки в условиях кавитации [8, 9]. Общие принципы кавитационных течений при взаимодействии твердых тел с жидкостью изложены в [10, 11].

Настоящая статья представляет собой развитие результатов предыдущих работ автора [4, 5] на случай плавающего тела более общей формы. В ней рассматривается задача о горизонтальном и отрывном ударе эллиптического цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости и его последующем движении в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Существенно отметить, что первоначальная зона отрыва, образующаяся на поверхности тела сразу после удара, от физических параметров задачи (чисел Фруда и кавитации) не зависит. Эти величины проявляют себя уже после мгновенного процесса удара. При малых числах Фруда, которые соответствуют небольшим скоростям движения цилиндра, возмущения внутренней и внешней свободных границ жидкости будут незначительными, и рассматриваемый процесс главным образом сводится к изучению динамики точек отрыва. Аналогично работам [4, 5] показывается, что данная задача при малых числах Фруда сводится к решению смешанной краевой задачи теории потенциала с односторонними ограничениями на поверхности тела. На ее основе определяется динамика точек отрыва, форма тонкой каверны и реакция жидкой и газобразной (в каверне) среды на тело.

Постановка задачи

Рассматривается плоская задача об отрывном ударе эллиптического цилиндра под свободной поверхностью идеальной несжимаемой тяжелой жидкости. Предполагается, что после удара цилиндр движется в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Позади тела образуется присоединенная каверна, форма которой зависит от искусственной подачи газа, а также от физических и геометрических параметров задачи. Требуется изучить процесс схлопывания каверны при медленных движениях цилиндра после удара. Метод решения данной задачи основан на предположении, что точки отрыва внутренней свободной границы жидкости монотонно сближаются. Схлопывание каверны происходит тогда, когда зона отрыва полностью исчезает. Математическая постановка задачи, записанная в безразмерных переменных в подвижной системе координат, связанной с цилиндром, имеет вид (рис. 1)

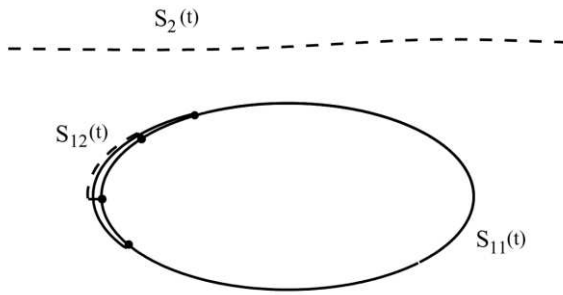


Рис. 1. Постановка задачи. Формы присоединенных каверн при $\varepsilon = 0,5$; $\tau = 0,2; 0,4$
 / Fig. 1. Formulation of the problem.
 Forms of attached cavities at $\varepsilon = 0.5$; $\tau = 0.2; 0.4$

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

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

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\tau} - \varepsilon^2 \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{1}{2} \varepsilon^2 (\nabla\varphi)^2 + y - H - 0,5\chi = 0, \quad r \in S_{12}(t);$$

$$\frac{(\varphi_x - 1)x + \varphi_y y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \left[R_0'(\theta) + \frac{\partial\zeta}{\partial\theta} \right] \dot{\theta}(\tau) + \varepsilon^{-2} \frac{\partial\zeta}{\partial\tau},$$

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

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

$$r \in S_2(t),$$

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

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

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

$$\Delta\varphi_0 = 0, \quad r \in \Omega(0); \quad \varphi_0 = 0, \quad y = H,$$

$$\frac{\partial\varphi_0}{\partial n} = n_x, \quad \varphi_0 \leq 0, \quad r \in S_{11}(0);$$

$$\frac{\partial\varphi_0}{\partial n} \geq n_x, \quad \varphi_0 = 0, \quad r \in S_{12}(0);$$

$$\frac{\partial\varphi_0}{\partial y} = 0, \quad y = -H_b; \quad \nabla\varphi_0 \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \pm\infty.$$

Функции φ, ζ, ψ , удовлетворяющие системе (1), выражаются через потенциал скоростей Φ и возмущения внутренней и внешней свободных границ жидкости η и ξ :

$\Phi(x, y, \varepsilon\tau) = \varepsilon\varphi(x, y, \tau)$, $\zeta(\theta, \tau) = \eta(\theta, \varepsilon\tau)$, $\psi(x, \tau) = \xi(x, \varepsilon\tau)$, где τ – растянутое время, связанное с безразмерным временем t равенством $t = \varepsilon\tau$.

Характерными физическими параметрами задачи являются числа Фруда и кавитации (малый параметр ε совпадает с числом Фруда): $\varepsilon = Fr = \frac{v_0}{\sqrt{ga}}$, $\chi = 2 \frac{p_a - p_c}{\rho ga}$.

Безразмерные переменные вводятся с помощью соотношений:

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

где штрихами помечаются размерные величины. Неподвижные координаты X, Y связаны с подвижными x, y равенствами $X = x + h(t)$, $Y = y$.

В работе также используются следующие обозначения: $\Omega(t)$ – область течения жидкости; $S_{11}(t)$ – часть поверхности цилиндра, на которой не происходит отрыва частиц жидкости; $S_{12}(t)$ – оторвавшаяся от поверхности цилиндра внутренняя свободная граница жидкости (граница каверны); S – граница всего тела; $S_2(t)$ – внешняя свободная поверхность жидкости ($y = H$ – ее невозмущенный уровень); $\rho = \text{const}$ – плотность жидкости; p_a – атмосферное давление; p_c – давление в каверне; $\dot{h}(t) = v_0$ – скорость движения цилиндра после удара; $y = -H_b$ – дно бассейна; a, b – полуоси эллипса; \mathbf{r} – радиус-вектор с координатами (x, y) .

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

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

Внутренняя свободная граница описывается в полярных координатах (R, θ) , функция $R_0(\theta)$ определяет форму эллипса:

$$R_0(\theta) = \left(\cos^2(\theta) + \delta^{-2} \sin^2(\theta) \right)^{-0.5}, \quad \delta = ba^{-1}.$$

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

Течение жидкости в начальный момент времени (момент, непосредственно следующий после удара) определяется на основе решения классической модели удара с отрывом [1].

Асимптотика при малых числах Фруда

Решение задачи (1) будем искать в виде следующих асимптотических разложений:

$$\varphi(x, y, \tau) = \varphi_1(x, y, \tau) + \dots; \quad \zeta(\theta, \tau) = \varepsilon^2 \zeta_1(\theta, \tau) + \dots; \quad \psi(x, \tau) = \varepsilon^2 \psi_1(x, \tau) + \dots;$$

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

где $\Theta_1(t), \Theta_2(t)$ – угловые координаты точек отрыва в момент времени t , а многоточием обозначены члены более высокого порядка малости по ε .

С помощью формулы Тейлора применяется стандартная процедура сноса краевых условий на невозмущенный уровень и приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях ε . В результате для главного асимптотического приближения возникает смешанная краевая задача теории потенциала в первоначально невозмущенной области $\Omega(0)$. В ней вследствие интеграла Коши – Лагранжа краевые условия в зоне отрыва и на внешней свободной границе содержат производные по времени. Учитывая, что точки отрыва монотонно сближаются, проинтегрируем динамическое условие в зоне отрыва по времени от 0 до τ для любой фиксированной точки этой зоны, отвечающей моменту времени τ . Интегрируя еще динамическое условие на внешней свободной границе и учитывая краевые условия типа неравенств, придем к следующей задаче:

$$\Delta\varphi_1 = 0, \quad r \in \Omega(0), \tag{2}$$

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial n} = n_x, \quad (0,5\chi + H - y)\tau - \varphi_1 + \varphi_0 \geq 0, \quad r \in S_{11}(t), \tag{3}$$

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial n} \geq n_x, \quad (0,5\chi + H - y)\tau - \varphi_1 + \varphi_0 = 0, \quad r \in S \setminus S_{11}(t), \tag{4}$$

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

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial y} = 0, \quad y = -H_b; \quad \nabla\varphi_1 \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \pm\infty. \tag{5}$$

Объясним смысл краевых условий типа неравенств. Первое неравенство означает, что давление в зоне контакта не может быть ниже, чем давление в каверне. Второе запрещает жидким частицам входить внутрь твердого тела, хотя и не препятствует их отрыву от твердой поверхности. Полученная задача с односторонними ограничениями совпадает по своей структуре с классической задачей об ударе с отрывом, для которой доказана теорема существования и единственности решения. Важной особенностью задачи (2)–(5) является то, что ее решение имеет непрерывные первые производные в точках отрыва. Отсюда следует выполнение условия Кутты – Жуковского в главном асимптотическом приближении при малых числах Фруда. Отметим, что краевые условия типа неравенств фактически оказываются равносильными условию Кутты – Жуковского в точках отрыва. В частности, этим можно объяснить тот факт, что при малых числах Фруда и искусственной кавитации условие в зоне контакта имеет вид $p \geq p_c$. В естественной ситуации, когда $p_c \approx 0$, оно совпадает с условием $p \geq 0$. При больших и умерен-

ных числах Фруда такие рассуждения могут оказаться неверными, так как в этих случаях динамика задачи не описывается моделями с односторонними ограничениями. Также обратим внимание на то, что функция φ_0 , стоящая в краевом условии (4), равна нулю.

После решения задачи (2)–(5) возмущения свободных границ жидкости находятся по формулам:

$$R_0(\theta)^{-1}[(\varphi_{1x} - 1)x + \varphi_{1y}y] = R_0'(\theta)R_0(\theta)^{-2}[\varphi_{1y}x - (\varphi_{1x} - 1)y] + \frac{\partial \zeta_1}{\partial \tau}, \quad r \in S \setminus S_{11}(\tau), \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = \frac{\partial \psi_1}{\partial \tau}, \quad y = H.$$

Формулу (6) можно привести к более компактному виду:

$$f(\theta) \left[\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - n_x \right] = \frac{\partial \zeta_1}{\partial \tau}, \quad f(\theta) = \frac{(\cos^2 \theta + \delta^{-4} \sin^2 \theta)^{0,5}}{\cos^2 \theta + \delta^{-2} \sin^2 \theta}. \quad (7)$$

Интегрируя ее по τ с учетом нулевого начального условия, получим равенство

$$\zeta_1(\theta, \tau) = f(\theta) \int_0^\tau \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - n_x \right) d\tau. \quad (8)$$

Обратим внимание на то, что функция (8) не удовлетворяет однородным краевым условиям в точках отрыва (при $\theta = \theta_1(\tau), \theta_2(\tau)$). В этом случае необходимо построить специальные решения (типа пограничного слоя), эффективные вблизи указанных точек. В идеале эти решения должны удовлетворять кинематическому уравнению внутренней свободной границы жидкости (7) (в главном асимптотическом приближении); однородным краевым условиям в точках отрыва; условию согласования с решением (8) (внешнее решение); нулевому начальному условию. Эту проблему предлагается решить с помощью локальных функций, эффективных в маленькой окрестности фиксированного $\tau = \tau_*$:

$$\zeta_1(\theta, \tau) = (\tau + c(\tau_*)) f(\theta) \left[\frac{\partial \varphi_1}{\partial n}(\theta, \tau_*) - n_x \right]. \quad (9)$$

При $\tau = \tau_*$ функция (9) точно удовлетворяет дифференциальному уравнению (7) (а в маленькой окрестности τ_* приближенно, с высокой степенью точности) и однородным краевым условиям по θ в точках отрыва. Кроме этого, с помощью численных экспериментов показывается, что за счет выбора постоянной $c(\tau_*)$ удается добиться очень хорошего согласования с решением (8) (соответствующие кривые совпадают всюду, за исключением маленьких окрестностей точек отрыва). Отсюда следует, что при $\tau_* = 0$ должно выполняться однородное начальное условие ($c(0) = 0$). Подчеркнем, что при $\tau_* > 0$ нулевое начальное условие для локальной функции не обязано выполняться.

Таким образом, локальные решения (9) представляют собой однопараметрическое семейство решений, которое при каждом фиксированном τ_* подправляет решение (8) вблизи точек отрыва.

Далее остановимся на вопросе о совместном действии жидкой и газообразной (в каверне) среды на движущееся тело. Для обезразмеренных силы и момента ($\mathbf{F} \rightarrow \rho g a^2 \mathbf{F}, \mathbf{M} \rightarrow \rho g a^3 \mathbf{M}, p - p_c \rightarrow \rho g a(p - p_c)$) справедливы следующие представления:

$$\mathbf{F} = - \int_{S_{11}(\tau)} (p - p_c) \mathbf{n} ds, \quad \mathbf{F} = (F_x, F_y), \quad \mathbf{M} = \mathbf{j}M, \quad M = \int_{S_{11}(\tau)} (p - p_c)(x n_y - y n_x) ds,$$

$$p - p_c = 0,5 \chi + H - y - u, \quad u = \frac{\partial \varphi_1}{\partial \tau}.$$

При численной реализации некоторые трудности создает производная по времени, которая обычно заменяется разностным отношением. При этом для каждого фиксированного τ приходится решать задачу с односторонними ограничениями и повторять эту процедуру для более мелких шагов, добиваясь хорошей точности вычислений. Изложим более эффективный способ нахождения этой производной, основанный на применении вариационного признака Огазо [12].

Рассмотрим функцию $\varphi_1(\theta, \tau, \theta_1, \theta_2)$, которая является решением обычной смешанной краевой задачи теории потенциала вида (2)–(5) без учета неравенств с точками раздела краевых условий θ_1, θ_2 . Согласно принципу Огазо, данная функция (как функция θ_1, θ_2 при фиксированных θ, τ) имеет экстремум при $\theta_1 = \theta_1(\tau), \theta_2 = \theta_2(\tau)$. Находя полную производную этой функции по τ и учитывая, что ее частные производные по θ_1, θ_2 обращаются в ноль, определим искомую функцию u в зоне контакта на основе решения краевой задачи. Эта задача имеет вид (2)–(5) без учета неравенств со следующими изменениями в краевых условиях: в (3) нормальная производная равна нулю, в (4) $\tau = 1$ ($\varphi_0 = 0$). При этом точки раздела краевых условий соответствуют точкам отрыва для данного τ .

Численная реализация и анализ результатов

Для численного решения задачи (2)–(5) при любом фиксированном τ применяется специальный итерационный метод последовательного уточнения неизвестных заранее зон отрыва и контакта частиц жидкости. Согласно этому методу, данная нелинейная задача сводится к последовательному решению линейных краевых задач с фиксированными точками раздела краевых условий на границе тела. Последние задачи, имеющие вид (2)–(5) без учета неравенств, решаются методом конечных элементов с применением пакета FreeFem++ [13]. Более подробное описание этого метода дается в работах [2–4].

При рассмотрении конкретных численных примеров вводятся симметричные боковые стенки, удаленные от тела на большие расстояния ($x = \pm H_R, H_R = 6$). Фиксируются следующие параметры задачи: $\chi = 0; \delta = 0,5; H = 0,8; H_b = 2$. В таблице приведены численные значения угловых координат точек отрыва, а также компонент силы и момента при различных значениях τ . Схлопывание тонкой каверны происходит при $\tau \approx 0,53$. При увеличении τ сила сопротивления $|F_x|$ уменьшается, а подъемная сила F_y увеличивается. Момент M за рассматриваемый промежуток времени меняет знак. Следует отметить, что сразу после схлопывания тонкой каверны реакция жидкости на тело стабилизируется (происходит выход на стационарный режим). При этом сила сопротивления оказывается равной нулю (происходит согласование с парадоксом Даламбера).

Численные значения угловых координат точек отрыва, компонент силы и момента для случая $\chi = 0; H = 0,8; H_b = 2$ / The numerical values of the angular coordinates of the separation points, force and moment component for the case $\chi = 0; H = 0,8; H_b = 2$

τ	$\theta_1(\tau)$	$\theta_2(\tau)$	F_x	F_y	M
0	1,86	3,78	-0,61	0,73	-0,10
0,1	2,18	3,60	-0,60	0,91	-0,07
0,2	2,42	3,45	-0,56	1,08	-0,04
0,3	2,60	3,32	-0,49	1,26	0,001
0,4	2,74	3,19	-0,40	1,42	0,04
0,5	2,89	3,04	-0,24	1,55	0,05
0,52	2,94	2,98	-0,16	1,57	0,04

На рис. 1 изображены присоединенные каверны, соответствующие параметру $\varepsilon = 0,5$ и моментам растянутого времени $\tau = 0,2; 0,4$. На рис. 2 показано хорошее согласование решений (8) и (9) при $\tau = \tau_* = 0,4$ ($c(\tau_*) = 0,4$). Анализ форм каверн при других значениях τ позволяет утверждать, что с хорошей степенью точности можно положить $c(\tau_*) = \tau_*$.

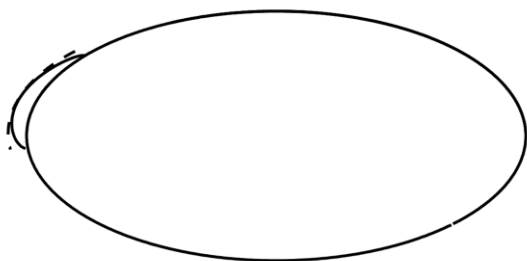


Рис. 2. Внутренняя свободная граница
вблизи точек отрыва для случая $\varepsilon = 0,5$; $\tau = 0,4$
/ Fig. 2. The internal free boundary near the
separation points for the case $\varepsilon = 0.5$; $\tau = 0.4$

Учитывая, что кривая (9) пересекает границу тела под прямым углом (это следует из свойства регулярности решения задачи с односторонними ограничениями), можно предложить простой способ определения формы каверны при малых числах Фруда. Он состоит в том, чтобы соединить кривую, определяемую по формуле (8), отрезком прямой, идущим по нормали к границе тела. Образующиеся на пересечении этих линий углы, конечно, требуют некоторого сглаживания. Однако на форму каверны в целом это не повлияет.

Отметим, что при увеличении давления в каверне сила сопротивления $|F_x|$ уменьшается. Так, например, при $\chi = -0,55$ и $\tau = 0,1$ величина $F_x \approx -0,38$, что сильно отличается от случая $\chi = 0$ и $\tau = 0,1$. При дальнейшем увеличении давления в каверне нарушается условие монотонного сближения точек отрыва.

Заключение

В работе описывается процесс схлопывания присоединенной каверны при медленных движениях эллиптического цилиндра в жидкости после отрывного удара. В главном асимптотическом приближении формулируется задача с односторонними ограничениями, на основе которой определяется динамика точек отрыва, форма тонкой каверны, а также реакция среды на тело. Рассматривается конкретный численный пример, демонстрирующий данный процесс схлопывания. Полученные результаты допускают обобщение на задачу о свободных кавитационных движениях эллиптического цилиндра в жидкости после отрывного удара.

Список источников

1. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука, 1966. 448 с.
2. Norkin M., Korobkin A. The motion of the free-surface separation point during the initial stage of horizontal impulsive displacement of a floating circular cylinder // J. Engng Math. 2011. Vol. 70. P. 239–254. Doi: 10.1007/s10665-010-9416-6.
3. Норкин М.В. Образование каверны при наклонном отрывном ударе кругового цилиндра под свободной поверхностью тяжелой жидкости // Сиб. журн. индустриальной математики. 2016. Т. 19, № 4. С. 81–92. Doi: 10.17377/sibjim.2016.19.409.
4. Норкин М.В. Динамика точек отрыва при ударе плавающего кругового цилиндра // Прикл. механика и техн. физика. 2019. Т. 60, № 5. С. 19–27. Doi: 10.15372/PMTF20190503.
5. Норкин М.В. Медленные движения кругового цилиндра в жидкости после отрывного удара // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 2. С. 16–21. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-16-21.
6. Reinhard M., Korobkin A.A., Cooker M.J. Cavity formation on the surface of a body entering water with deceleration // J. Engng Math. 2016. Vol. 96 (1). P. 155–174. Doi: 10.1007/s10665-015-9788-8.
7. Пегов В.И., Мошкин И.Ю. Расчет гидродинамики кавитационного способа старта ракет // Челябинский физ.-мат. журн. 2018. Т. 3, № 4. С. 476–485. Doi: 10.24411/2500-0101-2018-13408.
8. Bergant A., Simpson A.R., Tijsseling A.S. Water hammer with column separation: A historical review // J. Fluids Struct. 2006. Vol. 22, № 2. P. 135–171. Doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.08.008.
9. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Мустафин И.Н. Ударная кавитация жидкости в цилиндрической емкости // Учен. зап. Казанского ун-та. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 162, кн. 1. С. 27–37. Doi: 10.26907/2541-7746.2020.1.27-37.
10. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979. 536 с.
11. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1980. 240 с.
12. Лионс Ж.Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. М.: Мир, 1972. 416 с.
13. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Использование пакета конечных элементов FreeFem++ для задач гидродинамики, электрофореза и биологии. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 256 с.

References

1. Sedov L.I. *Plane problems of hydrodynamics and aerodynamics*. Moscow: Nauka Publ.; 1966. 448 p. (In Russ.).
2. Norkin M., Korobkin A. The motion of the free-surface separation point during the initial stage of horizontal impulsive displacement of a floating circular cylinder. *J. Engng Math.* 2011;70:239-254, doi: 10.1007/s10665-010-9416-6.
3. Norkin M.V. Cavity Formation at the Inclined Separated Impact on a Circular Cylinder under a Free Surface of a Heavy Liquid. *J. of Applied and Industrial Mathematics.* 2016;10(4):538-548, doi: 10.1134/S1990478916040104.
4. Norkin M.V. Dynamics of Separation Points upon Impact of a Floating Circular Cylinder. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics.* 2019;60(5):798-804, doi: 10.1134/S0021894419050031.
5. Norkin M.V. Slow Motions of a Circular Cylinder in a Liquid After a Separation Impact. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2021;(2):16-21, doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-16-21. (In Russ.).
6. Reinhard M., Korobkin A.A., Cooker M.J. Cavity formation on the surface of a body entering water with deceleration. *J. Engng Math.* 2016;96(1):155-174, doi: 10.1007/s10665-015-9788-8.
7. Pegov V.I., Moshkin I.Yu. Analysis of Fluid Dynamics of Cavitation Launch Technique. *Chelyabinskiy fiz.-mat. zhurn. = Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal.* 2018;3(4):476-485, doi: 10.24411/2500-0101-2018-13408. (In Russ.).
8. Bergant A., Simpson A.R., Tijsseling A.S. Water hammer with column separation: A historical review. *J. Fluids Struct.* 2006;22(2):135-171, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.08.008.
9. Aganin A.A., Ilgamov M.A., Mustafin I.N. Impact-induced cavitation in a cylindrical container with liquid. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki = Scientific Notes of the Kazan University. Physical and Mathematical Sciences.* 2020;162(1):27-37, doi: 10.26907/2541-7746.2020.1.27-37. (In Russ.).
10. Gurevich M.I. *Theory of jets of an ideal fluid*. Moscow: Nauka Publ.; 1979. 536 p. (In Russ.).
11. Ivanov A.N. *Hydrodynamics of developed cavitation flows*. Leningrad: Sudostroenie Publ.; 1980. 240 p. (In Russ.).
12. Lions J.L. *Optimal control of the systems described partial differential equations*. Moscow: Mir Publ.; 1972. 416 p. (In Russ.).
13. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. *Using the finite element package FreeFem++ for hydrodynamics problems, electrophoresis, and biology*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 256 p. (In Russ.).

Информация об авторе

М.В. Норкин – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича

Information about the author

M.V. Norkin - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 09.10.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья

УДК 517.95

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-30-37

НЕПРЕРЫВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РЕШЕНИЙ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ТРАНСПОРТА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НАНОСОВ ОТ ВХОДНЫХ ДАННЫХ ЗАДАЧИ

Валентина Владимировна Сидорякина

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), Таганрог, Россия

cvv9@mail.ru

Аннотация. Рассматривается цепочка линеаризованных на временной сетке задач, которые описывают процессы транспорта многокомпонентных наносов применительно к прибрежным морским системам. В предыдущих работах автора были найдены условия существования и единственности решения указанного класса задач с одновременным определением требований к классам гладкости входных данных. Результат настоящего исследования связан с получением априорной оценки нормы решения задачи в зависимости от интегральных оценок правой части, граничных условий и нормы начального условия. Полученные априорные оценки позволяют в дальнейшем строить дискретные модели, вычислительно устойчивые по отношению к малым ошибкам в исходных данных и к ошибкам, возникающим при проведении вычислений

Ключевые слова: наносы многокомпонентного состава, транспорт наносов, нелинейная начально-краевая задача, линеаризация начально-краевой задачи, исследование решений линеаризованной задачи

Для цитирования: Сидорякина В.В. Непрерывная зависимость решений линеаризованной начально-краевой задачи транспорта многокомпонентных наносов от входных данных задачи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 30–37.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00509, <https://rscf.ru/project/23-21-00509/>.

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

Original article

CONTINUOUS DEPENDENCE OF SOLUTIONS TO THE LINEARIZED INITIAL-BOUNDARY VALUE PROBLEM OF TRANSPORT OF MULTICOMPONENT SEDIMENTS ON THE INPUT DATA OF THE PROBLEM

Valentina V. Sidoryakina

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

A.P. Chekhov Taganrog Institute (branch) of the Rostov State University of Economics, Taganrog, Russia

cvv9@mail.ru

© Сидорякина В.В., 2024

Abstract. We consider a chain of problems linearized on a time grid that describe the processes of transport of multicomponent sediments in relation to coastal marine systems. In the author's previous works, the conditions for the existence and uniqueness of a solution to this class of problems were determined, while simultaneously determining the requirements for the smoothness classes of the input data of the problem. The result of this study is related to obtaining an a priori estimate of the norm for solving the problem depending on the integral estimates of the right-hand side, boundary conditions and the norm of the initial condition. The obtained a priori estimates allow us to further carry out computationally stable calculations with respect to small errors in the initial data and to errors that arise during calculations.

Keywords: sediments of multicomponent composition, sediment transport, nonlinear initial-boundary value problem, linearization of the initial boundary value problem, study of solutions to the linearized problem

For citation: Sidoryakina V.V. Continuous Dependence of Solutions to the Linearized Initial-Boundary Value Problem of Transport of Multicomponent Sediments on the Input Data of the Problem. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):30-37. (In Russ.).

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-21-00509, <https://rscf.ru/project/23-21-00509/>.

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

Введение

Изучение переноса и отложения наносов имеет решающее значение для понимания целого ряда практических приложений, таких как управление водными ресурсами, строительство плотин и дамб, дампинг грунта, а также прогнозирование и предотвращение геологических опасностей (оползни и обвалы, эрозия берегов) и др. [1–3]. Значимость проблемы транспорта наносов в особенности велика при проектировании водохранилищ, так как срок их заиления во многом зависит от наносного режима.

Основное внимание в исследованиях транспорта наносов уделяется различным аспектам моделирования данных процессов [4–6]. Моделирование транспорта наносов представляет собой достаточно серьезную проблему по причине сложного характера процесса [7–9]. Здесь при взаимодействии водного потока с подвижным слоем наносов наблюдаются различные турбулентные масштабы, характеризующиеся когерентной структурой, вызывающей движение частиц. Из-за непостоянства вертикальных и горизонтальных составляющих скоростей потока движение частиц имеет прерывистый характер: частицы могут перемещаться в водном потоке путем скольжения, сальтации и перекачивания по поверхности дна. Для выявления закономерностей формирования и миграции наносов важно учитывать качественный состав материала, который, как правило, не является однородным.

В настоящей работе рассматривается 2D-модель транспорта наносов, учитывающая многокомпонентный состав материала. Входными данными для модели являются компоненты вектора скорости водной среды, для расчета которых модель транспорта наносов дополняется моделями движения водной среды и турбулентности [7, 10].

В настоящее время вопросы, касающиеся корректности постановки нелинейной начально-краевой задачи, соответствующей рассматриваемой модели, не являются завершенными. Для её исследования выполнена линеаризация на временной сетке. В [11] получены условия единственности решения линеаризованной задачи.

Целью данной работы является установление непрерывной зависимости решения от входных данных. Следует отметить, что для получения этого результата автор использует методы из [12], где рассматривался частный случай наносов однокомпонентного состава.

Постановка задачи и её линейаризация на временной сетке

Пусть $G, G(x, y) = \{0 < x < L_x, 0 < y < L_y\}$ – область, где происходит процесс транспорта наносов. Для определенности считаем: CD совпадает с береговой линией, $\{0 \leq x \leq L_x, y = L_y\}$; AB – горизонтальная граница области, расположенная в зоне глубокой воды, $\{0 \leq x \leq L_x, y = 0\}$; AD и BC – боковые границы; $\bar{G} = G \cup AB \cup BC \cup CD \cup AD$.

Для описания транспорта многокомпонентных наносов воспользуемся системой уравнений диффузии – конвекции, которая может быть записана в следующем виде [6, 13]:

$$(1 - \bar{\varepsilon}) \frac{\partial H}{\partial t} + \sum_{r=1}^R \operatorname{div}(V_r k_r \tau_b) = \sum_{r=1}^R \operatorname{div} \left(V_r k_r \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \operatorname{grad} H \right) - \sum_{r=1}^R \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}), \quad r = \bar{1}, \bar{R}, \quad (1)$$

где $H = H(x, y, t)$ – глубина водоема; $\bar{\varepsilon}$ – усредненная по всем компонентам пористость донных отложений; V_r – объемная доля r -й компоненты; τ_b – вектор касательного тангенциального напряжения на дне водоема; $\tau_{bc,r}$ – критическое значение тангенциального напряжения для r -й компоненты наносов, $\tau_{bc,r} = a_r \sin \phi_0$, где a_r – некоторый коэффициент для r -й компоненты наносов; ϕ_0 – угол естественного откоса грунта в водоеме; w – компонента по вертикали вектора скорости движения водной среды; $w_{g,r}$ – гидравлическая крупность, или скорость осаждения r -й компоненты; ρ_r – плотность r -й компоненты донного материала; c_r – концентрация r -й фракции взвеси; k_r – коэффициент, определяемый соотношением

$$k_r = k_r(H, x, y, t) = \frac{A \tilde{\omega} d_r}{((\rho_r - \rho_0) g d_r)^\beta} \left| \tau_b - \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \operatorname{grad} H \right|^{\beta-1},$$

где $\tilde{\omega}$ – усредненная частота волн; d_r – характерный размер r -й компоненты; g – ускорение силы тяжести; ρ_0 – плотность водной среды; A и β – безразмерные постоянные.

Считаем, что трехмерный цилиндр $\Pi_T = G \times (0, T)$ высоты T с основанием G является областью задания уравнения (1).

Дополним уравнение (1) начальными и граничными условиями:

$$H(x, y, 0) = H_0(x, y), \quad H_0(x, y) \in C^2(G) \cap C(\bar{G}), \quad \operatorname{grad}_{(x,y)} H_0 \in C(\bar{G}), \quad (x, y) \in \bar{G}, \quad (2)$$

$$AB: |\tau_b| = 0, \quad H(x, 0, t) = H_3(x),$$

$$CD: H(x, L'_y, t) = H_4(x, t) \geq c_0 \equiv \text{const} > 0, \quad L'_y < L_y,$$

$$AD: H(0, y, t) = H_1(y, t), \quad (3)$$

$$BC: H(L_x, y, t) = H_2(y, t).$$

Дополнительно к граничным условиям (3) предполагаем выполнение условий их гладкости – существование непрерывных производных на границе области G , а также будем считать пренебрежимо малыми величины уклона дна на граничных линиях AD и BC в направлении оси

$$Ox: \operatorname{grad}_{(x,y)} H \in C(\bar{\Pi}_T) \cap C^1(\Pi_T), \quad \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0.$$

Условие невырожденности оператора задачи имеет вид

$$k_r \geq k_{0,r} = \text{const} > 0, \quad r = \bar{1}, \bar{R}, \quad \forall (x, y) \in \bar{G}, \quad 0 < t \leq T.$$

Вектор тангенциального напряжения на дне выражается с использованием единичных ортов системы координат естественным образом

$$\tau_b = \mathbf{i} \tau_{bx} + \mathbf{j} \tau_{by}, \quad \tau_{bx} = \tau_{bx}(x, y, t), \quad \tau_{by} = \tau_{by}(x, y, t).$$

Далее методами [8] выполним линейаризацию задачи (1)–(3) на временной сетке $\omega_\tau = \{t_n = n\tau, n = 0, 1, \dots, N, N\tau = T\}$.

Если $n = 1$, то в качестве $H^{(1)}(x, y, t_0)$ достаточно взять функцию начального условия, т.е. $H^{(1)}(x, y, t_0) = H_0(x, y)$. Если же $n = 2, \dots, N$, то функция $H^{(n)}(x, y, t_{n-1}) = H^{(n-1)}(x, y, t_{n-1})$ предполагается известной, поскольку считается решенной задача (1)–(3) для предыдущего временного промежутка $t_{n-2} < t \leq t_{n-1}$.

После линеаризации уравнение (1) запишем в виде

$$(1 - \bar{\varepsilon}) \frac{\partial H^{(n)}}{\partial t} = \sum_{r=1}^R \operatorname{div} \left(V_r k_r^{(n-1)} \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \operatorname{grad} H^{(n)} \right) - \sum_{r=1}^R \operatorname{div} (V_r k_r^{(n-1)} \tau_b) - \sum_{r=1}^R \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}), \quad (4)$$

$$r = \overline{1, R}, \quad t_{n-1} < t \leq t_n, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

где

$$k_r^{(n-1)} = \frac{A \tilde{\alpha} d_r}{((\rho_r - \rho_0) g d_r)^\beta} \left| \tau_b - \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \operatorname{grad} H^{(n-1)}(x, y, t_{n-1}) \right|^{\beta-1}.$$

Дополним уравнение (4) начальными условиями:

$$H^{(1)}(x, y, t_0) = H_0(x, y), \quad H^{(n)}(x, y, t_{n-1}) = H^{(n-1)}(x, y, t_{n-1}), \quad (x, y) \in \bar{G}, \quad n = 2, \dots, N. \quad (5)$$

Условия (3) на границе рассматриваемой области предполагаются выполненными для всех промежутков времени $t_{n-1} < t \leq t_n$, $n = 1, 2, \dots, N$.

Отметим, что в уравнении (4) член вида $\operatorname{div}(k_r^{(n-1)} \tau_b)$ будет являться известной функцией правой части.

Метод решения

Убедимся в непрерывной зависимости решения задачи (3)–(5) от входных данных. В своих рассуждениях придерживаемся логики, использованной для доказательства этого факта для случая задачи транспорта однокомпонентной взвеси [9].

Дополнительно будем предполагать, что всегда есть слой жидкости конечной толщины в исследуемой области, и для рассматриваемого временного промежутка не происходит осушения области, т.е.

$$H^{(n)}(x, y, t) \geq c_0 \equiv \text{const} > 0, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L'_y, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (6)$$

Уравнение (4) сначала умножим на функцию $H^{(n)}(x, y, t)$, а затем проинтегрируем по области G и после этого – по переменной t , $t_{n-1} < t \leq t_n$. Просуммировав обе части полученного соотношения по $n = 1, \dots, N$, получим

$$\begin{aligned} & (1 - \bar{\varepsilon}) \sum_{n=1}^N \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \iint_G H^{(n)} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial t} dx dy = \\ & = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N \left[\int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \left(\iint_G H^{(n)} \operatorname{div} \left(V_r k_r^{(n-1)} \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \operatorname{grad} H^{(n)} \right) dx dy \right) - \right. \\ & \left. - \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \left(\iint_G H^{(n)} \operatorname{div} (V_r k_r^{(n-1)} \tau_b) dx dy \right) \right] - \\ & - \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \left(\iint_G H^{(n)} \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) dx dy \right) dt, \quad r = \overline{1, R}. \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразования равенства (7) выполняются с использованием теоремы Остроградского – Гаусса, а также с учётом граничных условий (3) и тождеств $w|_{AB} \equiv 0$ (наносы не могут опускаться ниже поверхности дна). В результате имеем

$$\begin{aligned}
 & \iint_G \left[\left(H^{(n)}(T) \right)^2 - \left(H^{(n)}(0) \right)^2 \right] dx dy = \\
 & = \frac{2}{1-\varepsilon} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left\{ - \iint_G V_r k_r^{(n-1)} \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \left[\left(\frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \right. \\
 & - \int_{AB} H_3 \left(V_r k_r^{(n-1)} \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \right) \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} dx + \int_{BC} H_2 V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{bx} \right) dy - \\
 & - \int_{AD} H_1 V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{bx} \right) dy + \int_{CD} H_4 V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} - \tau_{by} \right) dx + \\
 & + \iint_G V_r k_r^{(n-1)} \tau_{bx} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} dx dy + \iint_G V_r k_r^{(n-1)} \tau_{by} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} dx dy - \frac{c_r}{\rho_r} \int_{AB} H_3 w_{g,r} dy + \\
 & \left. + \frac{c_r}{\rho_r} \int_{BC} H_2 (w + w_{g,r}) dy - \frac{c_r}{\rho_r} \int_{AD} H_1 (w + w_{g,r}) dy + \frac{c_r}{\rho_r} \int_{CD} H_4 (w + w_{g,r}) dx \right\} dt.
 \end{aligned} \tag{8}$$

С учетом оценок

$$\begin{aligned}
 & \left| \iint_G V_r k_r^{(n-1)} \tau_{bx} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} dx dy \right| \leq \frac{1}{2} \left[\iint_G V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} \right)^2 dx dy + \iint_D V_r k_r^{(n-1)} \tau_{bx}^2 dx dy \right], \\
 & \left| \iint_G V_r k_r^{(n-1)} \tau_{by} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} dx dy \right| \leq \frac{1}{2} \left[\iint_G V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} \right)^2 dx dy + \iint_D V_r k_r^{(n-1)} \tau_{by}^2 dx dy \right],
 \end{aligned}$$

равенство (8) преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
 & \iint_G \left[\left(H^{(n)}(T) \right)^2 - \left(H^{(n)}(0) \right)^2 \right] dx dy \leq \\
 & \leq \frac{2}{1-\varepsilon} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left\{ - \iint_D V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} - \frac{1}{2} \right) \left[\left(\frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \right. \\
 & - \int_{AB} H_3 \left[\left(V_r k_r^{(n-1)} \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \right) \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} - \frac{c_r}{\rho_r} w_{g,r} \right] dx + \\
 & + \int_{BC} H_2 \left[V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{bx} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right] dy - \\
 & - \int_{AD} H_1 \left[V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{bx} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right] dy + \\
 & + \int_{CD} H_4 \left[V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} - \tau_{by} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right] dx + \\
 & \left. + \frac{1}{2} \iint_D V_r k_r^{(n-1)} (\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2) dx dy \right\} dt.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Будем предполагать, что

$$\frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} > \frac{1}{2}. \tag{10}$$

Воспользуемся неравенством Фридрикса – Пуанкаре [14, 15]

$$\iint_G (H^{(n)})^2 dx dy \leq \left(\pi^2 \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{(L'_y)^2} \right) \right)^{-1} \iint_G \left[\left(\frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy, \quad (11)$$

где $L_x = \sup_{(x',y), (x'',y) \in G} |x' - x''|$, $L_y = \sup_{(x,y'), (x,y'') \in G} |y' - y''|$.

Тогда с учетом (10) оценку (9) можно усилить на основе неравенства (11)

$$\begin{aligned} \iint_D (H^2(T) - H^2(0)) dx dy &\leq \frac{2}{1 - \varepsilon} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left\{ \frac{1}{2} \iint_D V_r k_r^{(n-1)} (\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2) dx dy - \right. \\ &- \int_{AB} H_3 \left[\left(V_r k_r^{(n-1)} \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \right) \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} - \frac{c_r}{\rho_r} w_{g,r} \right] dx + \\ &+ \int_{BC} H_2 \left[V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{bx} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right] dy - \\ &- \int_{AD} H_1 \left[V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{bx} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right] dy + \\ &\left. + \int_{CD} H_4 \left[V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} - \tau_{by} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right] dx \right\} dt. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя (6), можно получить неравенство

$$\iint_G (H^{(n)}(T) - H^{(n)}(0)) dx dy \leq \frac{1}{2c_0} \left| \iint_G \left[(H^{(n)}(T))^2 - (H^{(n)}(0))^2 \right] dx dy \right|.$$

Учитывая ограниченность соответствующих функций и производных, а также используя неравенство многоугольника для модулей, получим из (12) следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \left| \iint_D (H^2(T) - H^2(0)) dx dy \right| &\leq \frac{2}{1 - \varepsilon} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left[M_1 \int_{AD} H_1 dy + M_2 \int_{BC} H_2 dy + \right. \\ &\left. + M_3 \int_{AB} H_3 dx + M_4 \int_{CD} H_4 dx + \frac{1}{2} M_5 \iint_D (\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2) dx dy \right] dt, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} M_1 &\equiv \max_{1 \leq r \leq R} \left\{ \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \max_{1 \leq n \leq N} \left\{ \max_{(x,y) \in AD} \left\{ \sum_{r=1}^R V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{bx} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right\} \right\} \right\} \right\}, \\ M_2 &\equiv \max_{1 \leq r \leq R} \left\{ \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \max_{1 \leq n \leq N} \left\{ \max_{(x,y) \in BC} \left\{ \sum_{r=1}^R V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{bx} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right\} \right\} \right\} \right\}, \\ M_3 &\equiv \max_{1 \leq r \leq R} \left\{ \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \max_{1 \leq n \leq N} \left\{ \max_{(x,y) \in AB} \left\{ \sum_{r=1}^R \left(V_r k_r^{(n-1)} \frac{\tau_{bc,r}}{\sin \phi_0} \right) \frac{\partial H^{(n)}}{\partial y} - \frac{c_r}{\rho_r} w_{g,r} \right\} \right\} \right\} \right\}, \\ M_4 &\equiv \max_{1 \leq r \leq R} \left\{ \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \max_{1 \leq n \leq N} \left\{ \max_{(x,y) \in CD} \left\{ \sum_{r=1}^R V_r k_r^{(n-1)} \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \phi_0} \frac{\partial H^{(n)}}{\partial x} - \tau_{by} \right) - \frac{c_r}{\rho_r} (w + w_{g,r}) \right\} \right\} \right\} \right\}, \\ M_5 &\equiv \max_{1 \leq r \leq R} \left\{ \max_{1 \leq n \leq N} \left\{ \max_{(x,y) \in D} \left\{ \sum_{r=1}^R V_r k_r^{(n-1)} (x, y, t_{n-1}) \right\} \right\} \right\}. \end{aligned}$$

Из неравенства (13) следует оценка, которая гарантирует устойчивость линеаризованной задачи по начальным и граничным условиям, а также функции правой части

$$\iint_D H(T) dx dy \leq \iint_D H(0) dx dy + \frac{1}{c_0(1-\bar{\varepsilon})} \sum_{r=1}^R \left[M_1 \int_0^T \left(\int_{AD} H_1 dy \right) dt + M_2 \int_0^T \left(\int_{BC} H_2 dy \right) dt + \right. \\ \left. + M_3 \int_0^T \left(\int_{AB} H_3 dx \right) dt + M_4 \int_0^T \left(\int_{CD} H_4 dx \right) dt + \frac{1}{2} M_5 \int_0^T \left(\iint_D (\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2) dx dy \right) dt \right].$$

Заключение

Новизна данной работы определяется постановкой нестационарной пространственно-двумерной математической задачи транспорта наносов, учитывающей их сложный многокомпонентный состав. Линеаризация соответствующей начально-краевой задачи выполнена на сетке по времени и для произвольного временного шага $t_{n-1} < t \leq t_n$, $n=1,2,\dots,N$. Введение сетки по времени позволило получить цепочку линеаризованных начально-краевых задач, которые могут быть эффективно решены на сетках высокого разрешения, содержащих от нескольких сотен тысяч до многих десятков миллионов ячеек. Без линеаризации было бы невозможно на сетках, содержащих такое число узлов, осуществлять непосредственное численное решение системы нелинейных уравнений в частных производных. Результатом проведенного исследования является получение априорной оценки нормы решения задачи транспорта многокомпонентных наносов в зависимости от интегральных оценок правой части, граничных условий и нормы начального условия. Данный результат позволяет в дальнейшем строить устойчивую аппроксимацию на пространственной сетке линеаризованной задачи.

Список источников

1. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
2. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. Построение дискретной двумерной математической модели транспорта наносов // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2011. Т. 8, № 121. С. 32–44.
3. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Бондаренко Ю.С. Оценка погрешности решения уравнения диффузии на основе схем с весами // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2011. Т. 8, № 121. С. 6–13.
4. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А., Шретер С.А. Сравнение вычислительных эффективностей явной и неявной схем для задачи транспорта наносов в прибрежных водных системах // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ2015): тр. Междунар. науч. конф. (31 марта – 2 апреля 2015 г., г. Екатеринбург). Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2015. С. 297–307.
5. Sidoryakina V.V. Efficient algorithms for the numerical solution of the coupled sediment and suspended matter transport problems in coastal systems // Proceedings of the 21st International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2019). Series: Atlantis Highlights in Computer Sciences. 2019. № 3. P. 243–248. Doi: 10.2991/csit-19.2019.42.
6. Sukhinov A., Belova Yu., Nikitina A., Sidoryakina V. Sufficient Conditions for the Existence and Uniqueness of the Solution of the Dynamics of Biogeochemical Cycles in Coastal Systems Problem // Mathematics. 2022. Vol. 10. P. 2092. <https://doi.org/10.3390/math101220928>.
7. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 296 с.
8. Ouda M., Toorman E.A. Development of a new multiphase sediment transport model for free surface flows // Int. J. of Multiphase Flow. 2019. № 117. P. 81–102. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.04.023>.
9. Aksoy H., Kavvas M.L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models // Catena. 2005. Vol. 64, № 2. P. 247–271. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.04.002>.
10. Сухинов А.И., Проценко Е.А., Сидорякина В.В., Проценко С.В. Численное моделирование воздействия ветровых течений на прибрежную зону крупных водохранилищ // Матем. физика и компьютерное моделирование. 2022. Т. 25, № 3. С. 15–30. Doi: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.2>.
11. Сидорякина В.В. Существование и единственность решения начально-краевой задачи транспорта многокомпонентных наносов прибрежных морских систем // Computational Mathematics and Information Technologies. 2023. Vol. 7 (2). P. 73–80. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-2-73-80>.
12. Сидорякина В.В., Сухинов А.И. Исследование корректности и численная реализация линеаризованной двумерной задачи транспорта наносов // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 2017. Т. 57 (6). С. 985–1002. <https://doi.org/10.7868/S0044466917060138>.

13. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Sidoryakina V.V. Parallel Solution of Sediment and Suspension Transportation Problems on the Basis of Explicit Schemes // *Communications in Computer and Information Science*. 2018. Vol. 910. P. 306–321. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99673-8_22.

14. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. М.: Либроком, 2015. 248 с.

15. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. М.: Мир, 1981. 408 с.

References

1. Leontiev I.O. *Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows*. Moscow: GEOS Publ.; 2001. 272 p. (In Russ.).

2. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Construction of a discrete two-dimensional mathematical model of sediment transport. *Izv. YuFU. Tekhn. nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2011;8(121):32-44. (In Russ.).

3. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Bondarenko Yu.S. Estimation of the error in solving the diffusion equation based on schemes with weights. *Izv. YuFU. Tekhn. nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2011;8(121):6-13. (In Russ.).

4. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A., Shreter S.A. Comparison of the computational efficiency of explicit and implicit schemes for the problem of sediment transport in coastal water systems. *Parallel Computing Technologies (PaVT'2015): Proceedings of the International Scientific Conference (March 31 - April 2, 2015, Ekaterinburg)*. Chelyabinsk: South Ural State University Press; 2015:297-307. (In Russ.).

5. Sidoryakina V.V. Efficient algorithms for the numerical solution of the coupled sediment and suspended matter transport problems in coastal systems. *Proceedings of the 21st International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2019)*. Series: Atlantis Highlights in Computer Sciences. 2019;(3):243-248, <https://doi.org/10.2991/csit-19.2019.42>.

6. Sukhinov A., Belova Yu., Nikitina A., Sidoryakina V. Sufficient Conditions for the Existence and Uniqueness of the Solution of the Dynamics of Biogeochemical Cycles in Coastal Systems Problem. *Mathematics*. 2022;10:2092, <https://doi.org/10.3390/math101220928>.

7. Marchuk G.I., Dymnikov V.P., Zalesny V.B. *Mathematical models in geophysical hydrodynamics and numerical methods for their implementation*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1987. 296 p. (In Russ.).

8. Ouda M., Toorman E.A. Development of a new multiphase sediment transport model for free surface flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 2019;(117):81-102, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.04.023>.

9. Aksoy H., Kavvas M.L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*. 2005;64(2):247-271, doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.04.002>.

10. Sukhinov A.I., Protsenko E.A., Sidoryakina V.V., Protsenko S.V. Numerical modeling of the impact of wind currents on the coastal zone of large reservoirs. *Matem. fizika i komp'yuternoe modelirovanie = Mathematical Physics and Computer Modeling*. 2022;25(3):15-30, doi: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.2>. (In Russ.).

11. Sidoryakina V.V. Existence and Uniqueness of the Initial-Boundary Value Problem Solution of Multi-component Sediments Transport in Coastal Marine Systems. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;7(2):73-80, <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-2-73-80>. (In Russ.).

12. Sidoryakina V.V., Sukhinov A.I. Well-posedness analysis and numerical implementation of a linearized two-dimensional bottom sediment transport problem. *Comput. Math. Math. Phys.* 2017;57(6):978-994, <https://doi.org/10.7868/S0044466917060138>.

13. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Sidoryakina V.V. Parallel Solution of Sediment and Suspension Transportation Problems on the Basis of Explicit Schemes. *Communications in Computer and Information Science*. 2018;910:306-321, https://doi.org/10.1007/978-3-319-99673-8_22.

14. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. *Numerical methods for solving convection-diffusion problems*. Moscow: Librokom Publ.; 2015. 248 p. (In Russ.).

15. Temam R. *Navier-Stokes equations*. Moscow: Mir Publ.; 1981. 408 p. (In Russ.).

Информация об авторе

В.В. Сидорякина – кандидат физико-математических наук, докторант, кафедра математики и информатики, ДГТУ; доцент кафедры математики, ТИ РГЭУ (РИНХ).

Information about the author

V.V. Sidoryakina - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Doctoral Student, Department of Mathematics and Informatics, DSTU; Associate Professor of the Department of Mathematics, TI RSUE.

Статья поступила в редакцию 23.10.2023; одобрена после рецензирования 15.11.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 23.10.2023; approved after reviewing 15.11.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья

УДК 517.983.24

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-38-42

О РАСШИРЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ГИЛЬБЕРТА

Алексей Николаевич Хопёрский¹, Рустам Викторович Конеев^{2✉},

Алексей Михайлович Надолинский³

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

¹hopersky_vm_1@rgups.ru

²koneev@gmail.com✉

³amnrnd@mail.ru

Аннотация. Представлена конструкция расширенного пространства Гильберта в виде прямой суммы пространств векторов конечной и бесконечной нормы как основного пространства в математическом формализме квантовой механики многоэлектронного атома. На примере построения аналитической структуры амплитуды вероятности $1s-3p$ фотовозбуждения атома неона дана реализация EHS-конструкции для решений уравнений самосогласованного поля Хартри – Фока.

Ключевые слова: пространство Гильберта, векторы конечной и бесконечной нормы, несобственный интеграл, ортонормированный базис, прямая сумма, условие замкнутости

Для цитирования: Хопёрский А.Н., Конеев Р.В., Надолинский А.М. О расширенном пространстве гильберта // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 38–42.

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

Original article

ON THE EXTENDED HILBERT SPACE

Alexey N. Hopersky¹, Rustam V. Koneev^{2✉}, Alexey M. Nadolinsky³

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

¹hopersky_vm_1@rgups.ru

²koneev@gmail.com✉

³amnrnd@mail.ru

Abstract. The construction of the extended Hilbert space is presented in the form of a direct sum of the spaces of vectors of finite and infinite norms as the main space in the mathematical formalism of quantum mechanics of a many-electron atom. On the example of constructing the analytical structure of the probability amplitude $1s-3p$ of photoexcitation of a neon atom, the implementation of the EHS-construct for solving the equations of the self-consistent Hartree-Fock field is given.

Keywords: Hilbert space, finite and infinite norm vectors, improper integral, orthonormal basis, direct sum, closedness condition

For citation: Hopersky A.N., Koneev R.V., Nadolinsky A.M. On the Extended Hilbert Space. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):38-42. (In Russ.).

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

© Хопёрский А.Н., Конеев Р.В., Надолинский А.М., 2024

Введение

Методы функционального анализа [1–3], теория линейных операторов в гильбертовом пространстве [4–6], теория обобщённых функций [7–10] позволяют решить, в частности, одну из фундаментальных математических проблем квантовой механики – проблему построения полного ортонормированного набора волновых функций дискретного и непрерывного спектров (основных и возбуждённых) состояний *многоэлектронного атома*. Суть проблемы в том, что волновые функции состояний непрерывного спектра обладают бесконечной нормой и, таким образом, не могут быть функциями пространства Гильберта. Как результат, функции с конечной нормой из пространства Гильберта не образуют полного ортонормированного набора, необходимого для описания квантовой динамики атома. Поль Дирак в монографии [11] высказал идею поиска «более общего, нежели гильбертово» пространства квантовой механики с использованием понятия *обобщённой* функции $\delta(\varepsilon - \varepsilon') = \begin{cases} 0, & \varepsilon \neq \varepsilon', \\ \infty, & \varepsilon = \varepsilon' \end{cases}$ для бесконечной нормы волно-

вой функции непрерывного спектра ($\varepsilon \in [0; \infty)$), но попыток построения такого пространства не предпринял. Конечно, здесь и далее подразумевается *функционал* («распределение») [7–10] $\delta(\varepsilon - \varepsilon') \rightarrow \langle \delta_{(\varepsilon)}, f \rangle = \int \delta(\varepsilon - \varepsilon') f(\varepsilon') d\varepsilon' = f(\varepsilon)$, где дельта-функция Дирака – *ядро* интегрального оператора. Иоганн фон Нейман в монографии [12] предпринял попытку математически строго решить проблему учёта состояний непрерывного спектра в классе обычных (локально интегрируемые) функций математического анализа, *оставаясь* при этом в пространстве Гильберта и используя так называемое разложение единицы (формально бесконечное семейство проекционных операторов [5]) для эрмитова оператора. Теория фон Неймана не нашла применения при решении конкретных задач квантовой механики многоэлектронного атома и «оказалась лишь одним из тех милых лиц, что на мгновение появляются из толпы, чтобы исчезнуть в ней навсегда» [13]. В работе авторов [14] идея П. Дирака [11] реализована через конструкцию расширенного пространства Гильберта. В данной статье мы дополняем математический формализм и физические результаты этой работы.

Результаты

Утверждение. Пусть $\{x_n\}$ – бесконечная и счётная ($n = 1, 2, \dots, \infty$) система линейно независимых векторов конечной нормы: $\|x_n\| = \sqrt{\langle x_n | x_n \rangle} = 1$ и $\langle x_n | x_m \rangle \neq \delta_{nm}$ (символ Кронекера – Вейерштрасса) при $n \neq m$. Пусть $\{\varepsilon\}$ – континуум ($\varepsilon \in [0; \infty)$) векторов бесконечной нормы: $\langle \varepsilon | \varepsilon' \rangle = \delta(\varepsilon - \varepsilon')$ (дельта-функция Дирака) и $\langle \varepsilon | x_m \rangle \neq 0$. Тогда система векторов $\{z_n\}$ и $\{\varepsilon\}$ образует полный ортонормированный базис бесконечномерного расширенного пространства Гильберта (Extended Hilbert Space; *EHS*) как прямой суммы *D*-пространства Гильберта векторов конечной нормы (состояния дискретного спектра) и его расширения (ортогонального дополнения) *C*-пространством векторов бесконечной нормы (состояния непрерывного спектра):

$$EHS = D \oplus C, \quad \{z_n\} \in D, \quad \{\varepsilon\} \in C, \quad (1)$$

$$|z_n\rangle = \frac{|y_n\rangle}{\|y_n\|}, \quad (2)$$

$$|y_n\rangle = |\bar{x}_n\rangle + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{in} |y_i\rangle, \quad (3)$$

$$|\bar{x}_n\rangle = a_n (|x_n\rangle - \int_0^\infty |\varepsilon\rangle \langle \varepsilon | x_n \rangle d\varepsilon), \quad (3)$$

$$\alpha_{in} = -\frac{\langle y_i | \bar{x}_n \rangle}{\|y_i\|^2}, \quad (4)$$

$$a_n = \left(1 - \int_0^\infty \langle \varepsilon | x_n \rangle^2 d\varepsilon\right)^{-1/2}, \quad (4)$$

$$\langle z_n | z_m \rangle = \delta_{nm}, \quad \langle \varepsilon | z_n \rangle = 0. \quad (5)$$

Доказательство. Пусть определены $\{x_n\}$ (система линейно независимых векторов конечной нормы) и $\{\varepsilon\}$ (континуум векторов бесконечной нормы). Переопределим $\{x_n\}$ следующим образом:

$$|x_n\rangle \rightarrow |\bar{x}_n\rangle = a_n(1 - \hat{L})|x_n\rangle, \langle \varepsilon | \bar{x}_n\rangle = 0. \quad (6)$$

Здесь a_n – нормировочный множитель ($\|\bar{x}_n\| = 1$) (4); $\hat{L} = \int_0^\infty |\varepsilon\rangle\langle \varepsilon| d\varepsilon$ – линейный интегральный оператор проектирования D -пространства на C -пространство. Система векторов (6) становится стартовой для реализации процесса ортогонализации Грама – Шмидта [2, 15]. После ортогонализации получаем ортонормированную систему векторов конечной нормы $\{z_n\}$ ((2) и (5)). Дополняя эту систему континуумом $\{\varepsilon\}$ -векторов бесконечной нормы, получаем прямую сумму D - и C -пространств как EHS -пространство. При этом, согласно (3), C «отражено» в D ($|z_n\rangle$ определены через $|\varepsilon\rangle$). В силу полноты набора $\{z_n\}$ - и $\{\varepsilon\}$ -векторов выполняется условие замкнутости [16]:

$$\hat{L} + \hat{P} = \delta(r - r'), \quad (7)$$

где определён оператор проектирования C -пространства на D -пространство $\hat{P} = \sum_{n=1}^\infty |z_n\rangle\langle z_n|$.

Действуя оператором (7) на произвольный вектор $|\psi\rangle \in EHS$ и интегрируя по r' , получаем представление $|\psi\rangle$ – вектора в ортонормированном базисе $|\psi\rangle = \int_0^\infty |\varepsilon\rangle\langle \varepsilon|\psi\rangle d\varepsilon + \sum_{n=1}^\infty |z_n\rangle\langle z_n|\psi\rangle$

и его норму (обобщённое равенство Парсевала [16]) $\|\psi\| = \left(\int_0^\infty \langle \varepsilon|\psi\rangle^2 d\varepsilon + \sum_{n=1}^\infty \langle z_n|\psi\rangle^2 \right)^{1/2}$, где предполагается сходимость несобственного интеграла и ряда.

Утверждение доказано.

В качестве примера реализации EHS -пространства для решений уравнений Хартри – Фока найдём матричный элемент (M) одноэлектронного \hat{r} -оператора радиационного перехода как амплитуду вероятности $1s \rightarrow 3p$ фотовозбуждения атома неона (Ne; заряд ядра атома $Z = 10$; конфигурация и терм основного состояния $[0] = 1s^2 2s^2 2p^6 [^1S_0]$): $\hbar\omega + [0] \rightarrow 1s(2s^2 2p^6) 3p(^1P_1)$, где \hbar – постоянная Планка; ω – круговая частота поглощаемого фотона. По утверждению

$$M = \eta \left(M_0 - \int_0^\infty M(\varepsilon) \langle \varepsilon p_+ | 3p_+ \rangle d\varepsilon \right), \quad M, M_0, M(\varepsilon) = \langle 1s_0 | \hat{r} | 3\tilde{p}_+, 3p_+, \varepsilon p_+ \rangle,$$

$$\langle 1s_0 | \hat{r} | 3p_+ \rangle = N_{1s} \left(\langle 1s_0 | \hat{r} | 3p_+ \rangle - \frac{\langle 1s_0 | \hat{r} | 2p_+ \rangle \langle 2p_0 | 3p_+ \rangle}{\langle 2p_0 | 2p_+ \rangle} \right),$$

$$N_{1s} = \langle 1s_0 | 1s_+ \rangle \langle 2s_0 | 2s_+ \rangle^2 \langle 2p_0 | 2p_+ \rangle^6, \quad (8)$$

$$\eta = \left(1 - \int_0^\infty \langle \varepsilon p_+ | 3p_+ \rangle^2 d\varepsilon \right)^{-1/2}, \quad \langle 3\tilde{p}_+ | 2p_+ \rangle = 0, \quad \langle 3p_+ | 2p_+ \rangle \neq 0,$$

$$\langle 3\tilde{p}_+ | \varepsilon p_+ \rangle = 0, \quad \langle 3p_+ | \varepsilon p_+ \rangle \neq 0.$$

Структуры (8) возникают при реализации методов теории неортогональных орбиталей [17]. Индексы «0» и «+» соответствуют радиальным частям волновых функций электронов, полученных решением уравнений самосогласованного поля Хартри – Фока [18] для конфигураций основного ($[0]$) и возбуждённого ($[1s_+ 2s_+^2 2p_+^6 3p_+]$) состояний атома Ne. В обозначениях утверждения $|x_1\rangle = |2p_+\rangle$, $|x_2\rangle = |3p_+\rangle$ и $|z_2\rangle = |3\tilde{p}_+\rangle$. Численное решение уравнений Хартри – Фока даёт заметное ($\sim 7\%$) отличие вероятностей $1s \rightarrow 3p$ фотовозбуждения атома Ne: $\frac{P_0}{P} \sim \left(\frac{M_0}{M} \right)^2 =$

$= 1,07$, где $P_0(P)$ – вероятность без учёта (с учётом) конструкции EHS -пространства.

Замечания

1. Если исходные системы векторов $\{|x_n\rangle\}$ и $\{|\varepsilon\rangle\}$ ортонормированы [$\langle x_n|x_m\rangle = \delta_{nm}$, $\|x_n\| = 1$, $\langle \varepsilon|x_n\rangle = 0$, $\langle \varepsilon|\varepsilon'\rangle = \delta(\varepsilon - \varepsilon')$], то процесс ортогонализации Грама – Шмидта теряет смысл и определено EHS -пространство вида (без «отражения» C в \bar{D}):

$$EHS = \bar{D} \oplus C, \quad \{|x_n\rangle\} \in \bar{D}, \quad \{|\varepsilon\rangle\} \in C. \quad (9)$$

Пространство (9) возникает, например, при описании состояний одноэлектронного атома водорода ($1s[{}^2S_{1/2}]$), где возможно (в отличие от уравнений Хартри – Фока) аналитическое решение стационарных уравнений Шрёдингера [19]: $\hat{H}|x_n\rangle = x_n|x_n\rangle$, $\hat{H}|\varepsilon\rangle = \varepsilon|\varepsilon\rangle$.

Здесь \hat{H} – эрмитов оператор Гамильтона атома; $\{x_n, \varepsilon\}$ – собственные значения; $\{|x_n\rangle, |\varepsilon\rangle\}$ – собственные функции оператора \hat{H} .

2. В работе [20] обнаружено, что в приближении Хартри – Фока $\langle \varepsilon|\varepsilon'\rangle = \delta(\varepsilon - \varepsilon') + \mathcal{P}\left(\frac{f(\varepsilon, \varepsilon')}{\varepsilon - \varepsilon'}\right)$, где \mathcal{P} – символ главного значения (несобственного интеграла) в смысле Коши и $f(\varepsilon, \varepsilon') \neq 0$ при $\varepsilon \neq \varepsilon'$. Таким образом, нелокальность обменного потенциала в уравнении Хартри – Фока нарушает требование нормируемости волновых функций непрерывного спектра на «чистую» δ -функцию Дирака. Формально математически этот результат не имеет отношения к утверждению, но говорит о необходимости аналитической модификации широко используемого в литературе приближения Хартри – Фока.

3. Согласно (3), особенностью прямой суммы (1) оказывается тот факт, что D -пространство становится «гильбертовым» через C -пространство векторов бесконечной нормы («от-себя-к-себе через иное-самого-себя» [21]).

Список источников

1. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Физматлит, 2012. 544 с.
2. Рид М., Саймон Б. Методы современной математической физики. Функциональный анализ. М.: Мир, 1977. Т. 1. 355 с.
3. Рисс Ф., Сёкефальви-Надь Б. Лекции по функциональному анализу. М.: Мир, 1979. 592 с.
4. Данфорд Н., Шварц Дж. Т. Линейные операторы. Спектральная теория. Самосопряжённые операторы в гильбертовом пространстве. М.: Мир, 1966. Т. 2. 1063 с.
5. Ахиезер Н.И., Глазман И.М. Теория линейных операторов в гильбертовом пространстве. М.: Наука, 1966. 544 с.
6. Садовничий В.А. Теория операторов. М.: Изд-во МГУ, 1986. 368 с.
7. Schwartz L. Théorie des distributions. Vol. 1, 2. Paris: Hermann, 1959.
8. Шварц Л. Математические методы физических наук. М.: Мир, 1965. 740 с.
9. Гельфанд И.М., Шилов Г.Е. Обобщённые функции. Вып. 1: Обобщённые функции и действия над ними. М.: Физматгиз, 1959. 243 с.
10. Бремерман Г. Распределения, комплексные переменные и преобразования Фурье. М.: Мир, 1968. 276 с.
11. Дирак П. Принципы квантовой механики. М.: Наука, 1979. 481 с.
12. Нейман фон И. Математические основы квантовой механики. М.: Наука, 1964. 367 с.
13. Ходос А. Теории Калуцы – Клейна: общий обзор // УФН. 1985. Т. 146. С. 647.
14. Hoppersky A.N., Nadolinsky A.M. On the completeness of one-particle states of a many-electron atom in an extended Hilbert space // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2011. Vol. 44, № 7. P. 075001.
15. Ланкастер П. Теория матриц. М.: Наука, 1978. 282 с.
16. Мессиа А. Квантовая механика. М.: Наука, 1978. Т. 1. 478 с.
17. Jucys A.P., Našlėnas E.P., Žvirblis P.S. The general theory of the extended method of calculation of atomic structures // Int. J. Quantum Chemistry. 1972. Vol. 6. P. 465.
18. Froese Fischer Ch., Brage T., Jönsson P. Computational Atomic Structure: An MCHF Approach. Bristol; Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1997. 280 p.
19. Шифф Л. Квантовая механика. М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. 471 с.

20. Novikov S.A., Hopersky A.N. Free-free matrix elements for a many-electron atom // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2011. Vol. 44, № 23. P. 235001.
21. Гегель Г.В.Ф. Наука логики. Т. 2: Учение о сущности. М.: Мысль, 1971. 248 с.

References

1. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elements of the theory of functions and functional analysis*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2012. 544 p. (In Russ.).
2. Reed M., Simon B. *Methods of modern mathematical physics. Functional analysis*. Moscow: Mir Publ.; 1977. Vol. 1. 355 p. (In Russ.).
3. Riesz F., Szökefalvi-Nagy B. *Lectures on functional analysis*. Moscow: Mir Publ.; 1979. 592 p. (In Russ.).
4. Dunford N., Schwartz J.T. *Linear operators. Spectral theory. Self-adjoint operators in Hilbert space*. Moscow: Mir Publ.; 1966. Vol. 2. 1063 p. (In Russ.).
5. Akhiezer N.I., Glazman I.M. *Theory of linear operators in Hilbert space*. Moscow: Nauka Publ.; 1966. 544 p. (In Russ.).
6. Sadovnichy V.A. *Theory of operators*. Moscow: Moscow State University Press; 1986. 368 p. (In Russ.).
7. Schwartz L. *Théorie des distributions*. Vol. 1, 2. Paris: Hermann Publ.; 1959.
8. Schwartz L. *Mathematical methods of physical sciences*. Moscow: Mir Publ.; 1965. 740 p. (In Russ.).
9. Gelfand I.M., Shilov G.E. *Generalized functions*. Iss. 1: Generalized functions and actions on them. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1959. 243 p. (In Russ.).
10. Bremerman G. *Distributions, complex variables and Fourier transforms*. Moscow: Mir Publ.; 1968. 276 p. (In Russ.).
11. Dirac P. *Principles of quantum mechanics*. Moscow: Nauka Publ.; 1979. 481 p. (In Russ.).
12. Von Neumann J. *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Moscow: Nauka Publ.; 1964. 367 p. (In Russ.).
13. Khodos A. Kaluza-Klein theories: a general overview. *UFN = Advances in Physical Sciences*. 1985;146: 647. (In Russ.).
14. Hopersky A. N., Nadolinsky A. M. On the completeness of one-particle states of a many-electron atom in an extended Hilbert space. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2011;44(7):075001.
15. Lancaster P. *Matrix Theory*. Moscow: Nauka Publ.; 1978. 282 p. (In Russ.).
16. Messia A. *Quantum mechanics*. Moscow: Nauka Publ.; 1978. Vol. 1. 478 p. (In Russ.).
17. Jucys A. P., Našlėnas E. P., Žvirblis P.S. The general theory of the extended method of calculation of atomic structures. *Int. J. Quantum Chemistry*. 1972;6:465.
18. Froese Fischer Ch., Brage T., Jönsson P. *Computational Atomic Structure: An MCHF Approach*. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publ.; 1997. 280 p.
19. Schiff L. *Quantum mechanics*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature; 1959. 471 p. (In Russ.).
20. Novikov S.A., Hopersky A. N. Free-free matrix elements for a many-electron atom. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2011;44(23):235001.
21. Hegel G.V.F. *The science of logic*. Vol. 2: The doctrine of essence. Moscow: Mysl' Publ.; 1971. 248 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.Н. Хопёрский – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики.
Р.В. Конеев – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики.
А.М. Надолинский – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики.

Information about the authors

A.N. Hopersky - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics.
R.V. Koneev - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics.
A.M. Nadolinsky - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Department of Physics.

Статья поступила в редакцию 20.09.2023; одобрена после рецензирования 14.10.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 20.09.2023; approved after reviewing 14.10.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья
УДК 532.5, 556
doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-43-55

СТАЦИОНАРНОЕ ПРОТЕКАНИЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ СКВОЗЬ ДВУХМЕРНЫЙ РАЗВЕТВЛЕННЫЙ КАНАЛ

Елена Владимировна Ширяева^{1✉}, Алина Сергеевна Шокарева²,
Валентина Павловна Сибиль³

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

¹evshiryaeva@sfedu.ru✉

²shsalina@yandex.ru

³valery2010new@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты численного эксперимента для задачи о стационарном протекании несжимаемой вязкой жидкости сквозь разветвленный плоский (двухмерный) канал. Область, в которой происходит течение, моделирует либо кровеносные сосуды, либо дельту реки. Для вычислений используется метод конечных элементов и модификация метода штрафов, а также метод расщепления. Реализация алгоритма вычислений осуществлена при помощи пакета FreeFem++. Основная цель, помимо исследования свойств и структуры стационарного течения, – демонстрация эффективности предложенной модификации метода штрафов. Предполагается, что область имеет один входной участок границы, через который жидкость вытекает в область, и несколько (пять) участков границы, через которые жидкость вытекает из области. Остальные участки границы области считаются непроницаемыми для жидкости. На входном участке задается краевое условие, отвечающее течению Пуазейля в плоском прямолинейном канале. На выходных участках границы рассмотрены три типа краевых условий: 1-й соответствует условиям сохранения движения жидких частиц – материальная производная скорости равна нулю; 2-й – заданию скорости течения; 3-й – заданию одинакового давления. Стационарное решение строится методом установления. Фактически решается нестационарная задача на достаточно большом интервале времени. В качестве начального условия для нестационарной задачи выбирается течение, которое на некотором участке вблизи входной границы является течением Пуазейля. Исследована зависимость скорости сходимости метода установления от начальных данных. Обнаружено, что течение Пуазейля, заданное на входном участке границы области, индуцирует аналогичные течения Пуазейля и на выходных участках границ области во всех указанных случаях краевых условий. Для области с пятью участками выходных границ для некоторой конфигурации области обнаружено наличие стационарных вихревых течений («водоворотов»).

Ключевые слова: течение вязкой жидкости, протекание, метод конечных элементов, метод штрафов, метод расщепления

Для цитирования: Ширяева Е.В., Шокарева А.С., Сибиль В.П. Стационарное протекание несжимаемой вязкой жидкости сквозь двухмерный разветвленный канал // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 43–55.

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

Original article

STATIONARY FLOW OF INCOMPRESSIBLE VISCOUS FLUID THROUGH A TWO-DIMENSIONAL BRANCHED CHANNEL

Elena V. Shiryaeva^{1✉}, Alina S. Shokareva², Valentina P. Sibil³

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

¹evshiryaeva@sfnu.ru ✉

²shsalina@yandex.ru

³valery2010new@mail.ru

Abstract. The results of a numerical experiment for the problem of an incompressible viscous fluid stationary flow through a branched planar (two-dimensional) channel are presented. The region in which the flow occurs simulates either blood vessels or a river delta. The finite element method and a modification of the penalty method, as well as the splitting method, are used for calculations. The implementation of the calculation algorithm is using with the help the package FreeFem++. The main goal, in addition, of course, to study the properties and structure of the stationary flow, is to demonstrate the effectiveness of the proposed modification of the penalty method. It is assumed that the region has one input boundary section through which the liquid flows into the region, and several (five) boundary sections through which the liquid flows out of the region. The remaining sections of the region boundary are considered impermeable to liquid. The boundary condition corresponding to the Poiseuille flow in a plane rectilinear channel is set at the input section. Three types of boundary conditions are considered on the output boundary sections. 1. The boundary conditions correspond to the conditions of conservation of motion of fluid particles i. e. the material derivative of the velocity is zero. 2. The boundary conditions correspond to the setting of the flow velocity. 3. The boundary conditions correspond to the setting of the same pressure. The stationary solution is constructed by the relaxation method. In fact, a non-stationary problem is solved over a sufficiently large time interval. As an initial condition for a non-stationary problem, a flow is chosen that is a Poiseuille flow in some region near the input boundary. The dependence of the convergence rate of the relaxation method on the initial data is investigated. It is found that the Poiseuille flow, given at the input section of the boundary of the region, induces similar Poiseuille flows at the output boundaries sections of the region in all these cases of boundary conditions. For a region with five sections of the output boundaries for some configuration of the region, the presence of stationary vortex flows ('maelstrom') is found.

Keywords: viscous fluid flow, through flow, finite element method, penalty method, splitting method

For citation: Shiryaeva E.V., Shokareva A.S., Sibil V.P. Stationary Flow of Incompressible Viscous Fluid Through a Two-Dimensional Branched Channel. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):43-55. (In Russ.).

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

Введение

Рассмотрена задача о протекании вязкой несжимаемой жидкости сквозь область, имеющую один входной участок границы и несколько (в представленном варианте расчетов – пять) выходных. Конфигурация области выбрана достаточно произвольной, но входные и выходные участки представляют собой прямолинейные каналы (рис. 1). Считается, что течение жидкости описывается полными уравнениями Навье – Стокса. С физической точки зрения задача о сквозном протекании имитирует, например, течение в дельте реки [1] или в сети разветвленных кровеносных сосудов [2]. Такая двухмерная имитация является достаточно грубой, так как в случае течения реки предполагает постоянную глубину русла, и более правильным было бы использование уравнений типа мелкой воды [3]. В случае кровеносных сосудов уместно было бы учитывать их цилиндрическую форму. Однако и в плоской двухмерной постановке задачи удастся получить

информацию о структуре течения и обнаружить вихри, соответствующие водоворотам, в стационарном течении реки (застойные зоны в кровеносных сосудах).

Одной из проблем, возникающих при аналитическом и численном исследовании течения несжимаемой вязкой (и идеальной) жидкости, является постановка краевых условий на выходных участках границы области. В частности, для несжимаемой жидкости выполнено уравнение неразрывности $u_x + w_y = 0$, где u, w – соответствующие компоненты скорости. Если на участке границы $x = const$ потребовать, чтобы $w = 0$, то на этом участке $w_y = 0$ и в силу уравнения неразрывности $u_x = 0$. Иными словами, естественное условие $u_x = 0$ будет выполнено автоматически, и задача становится недоопределенной – требуется дополнительное условие. Различные варианты таких условий детально исследуются в случае идеальной жидкости в [4–11] (см. также цитируемую в [11] литературу), для вязкой жидкости – в [12–14]. Более подробно некоторые краевые условия для задачи протекания обсуждаются ниже при постановке задачи.

Для численного решения задачи протекания в прямолинейных каналах, как правило, применяются конечно-разностные методы [12, 15–17]. В случае каналов, имеющих сложную конфигурацию, разумно использовать вариационно-разностные методы (метод конечных элементов) [18–23], что и сделано в представленной работе. В качестве алгоритмов численного решения задач для уравнений Навье – Стокса использованы методы штрафов [19] и проекций Чорина [23, 24] (по другой терминологии – метод расщепления [15, с. 132–135]).

Основная цель представленной работы – исследование свойств и структуры стационарного течения при различных краевых условиях, подтверждение возможности построения методом установления численного решения, соответствующего стационарному протеканию жидкости через область, демонстрация эффективности предложенной модификации метода штрафов.

Область и постановка задачи

Рассматривается протекание несжимаемой вязкой жидкости сквозь область \mathbb{D} , показанную на рис. 1. Граница $\partial\mathbb{D}$ области состоит из линий L_k , начало и конец которых задаются координатами $(x_k, y_k), (x_{k+1}, y_{k+1})$. Часть линий L_k ($k = 1, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 24, 27, 28, 29, 31, 32$) – отрезки прямых, параллельных осям координат, другая часть ($k = 2, 6, 7, 9, 13, 14, 18, 19, 23, 25, 26, 30$) – кубические (четырёхточечные) кривые Безье. Считается, что жидкость втекает в область через один участок границы L_{32} и вытекает из области через несколько (пять) участков границы: $L_4, L_{11}, L_{16}, L_{21}, L_{28}$ (рис. 1). Значения координат (x_k, y_k) и параметры кривых Безье приведены ниже.

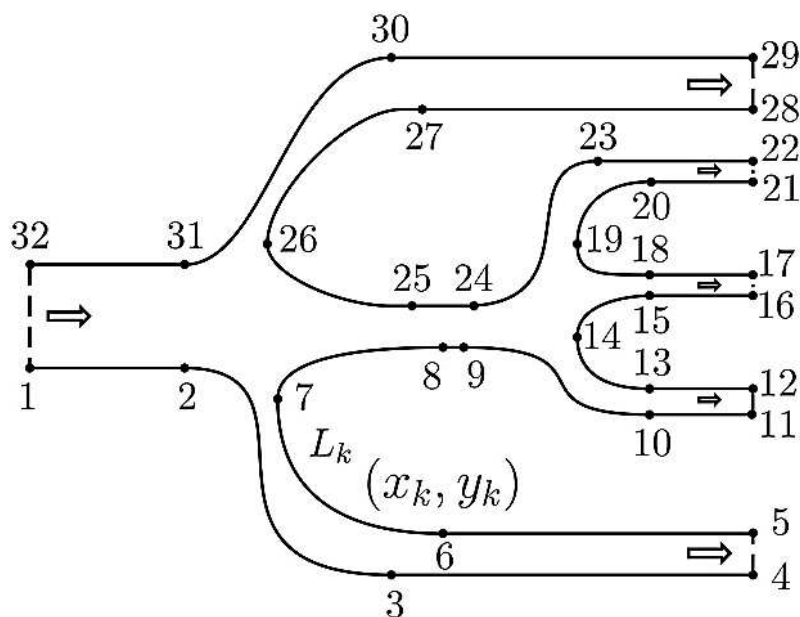


Рис. 1. Область \mathbb{D} / Fig. 1. Area \mathbb{D}

Для описания процесса протекания вязкой несжимаемой жидкости через область \mathbb{D} используем уравнения Навье – Стокса в безразмерных переменных [25]

$$\mathbf{v}_t + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (x, y) \in D, \quad (2)$$

где $\mathbf{v} = (u, w)$ – скорость; p – давление; μ – кинематическая вязкость (число Рейнольдса $\operatorname{Re} = \mu^{-1}$); \mathbb{D} – область, заполненная жидкостью.

Далее компоненту скорости u вдоль оси x и компоненту скорости w вдоль оси y называем, соответственно, горизонтальной и вертикальной, хотя при отсутствии поля тяжести понятия «горизонтальный» и «вертикальный» являются условными.

Части границы без входного и выходных участков считаем твердыми непроницаемыми стенками, на которых заданы условия прилипания:

$$\mathbf{v} = 0, \quad (x, y) \in \partial \mathbb{D} \setminus (L_{32} \cup L_4 \cup L_{11} \cup L_{16} \cup L_{21} \cup L_{28}). \quad (3)$$

На входном участке границы L_{32} задаем условие, соответствующее течению Пуазейля в прямолинейном канале

$$u = u_0(y) \equiv 4U_m \frac{(y-y_1)(y_{32}-y)}{y_{32}-y_1}, \quad w = 0, \quad (x, y) \in L_{32}, \quad (4)$$

где U_m – максимальное значение скорости течения.

Один из возможных вариантов краевых условий на выходных участках границы имеет вид

$$\frac{du}{dt} = 0, \quad w = 0, \quad (x, y) \in L_k, \quad k = 4, 11, 16, 21, 28. \quad (5)$$

Краевые условия (3)–(5) отвечают ситуации, при которой область \mathbb{D} «продолжена» влево и вправо (для координат $x < x_1 = x_{32}$ и $x > x_4 = x_5 = x_{11} = x_{12} = x_{16} = x_{17} = x_{21} = x_{22} = x_{28} = x_{29}$).

Действительно, краевое условие (4), соответствующее течению Пуазейля, означает, что жидкость поступает в область из прямолинейного канала, в котором имеется стационарное течение Пуазейля, (5) – что на выходных участках границы сохраняется скорость горизонтального течения (скорость жидких частиц). В некотором смысле участки границы, через которые происходит вытекание жидкости, являются фиктивными (без ущерба физическому смыслу прямолинейные участки выходных каналов могут быть продолжены вправо, конечно, в случае условий (5)). Заметим, что условия вида (5) часто используются для решении задач гидродинамики при помощи пакета конечных элементов FreeFem++ [20].

Другим вариантом являются краевые условия:

$$u(x, y)|_{\Gamma_k} = u_*^k (y - Y_k - h_k)(Y_k - y), \quad w^k(x, y) = 0, \quad k = 1, \dots, 5, \quad (6)$$

$$Y_1 = y_4, \quad Y_2 = y_{11}, \quad Y_3 = y_{16}, \quad Y_4 = y_{21}, \quad Y_5 = y_{28},$$

где u_*^k – некоторые заданные постоянные характерные скорости.

Условия (6) соответствуют заданию профилей скорости (в данном случае – течения Пуазейля) на выходных участках границы. С математической точки зрения такой вариант наиболее простой (задача становится полностью определенной), а также крайне удобен при численной реализации алгоритмов решения. Однако на практике реализовать такие условия достаточно сложно – скорость определяется конфигурацией области и заранее неизвестна.

Еще один вариант краевых условий – задание на выходных границах величин давления

$$p(x, y)|_{\Gamma_k} = p_k, \quad (7)$$

где p_k – некоторые постоянные заданные величины давлений.

Условия вида (7) использованы при решении задач протекания в [12–14]. Заметим, что ситуация, при которой все p_k одинаковы, моделирует вытекание жидкости в область постоянного давления (водоем, море, озеро и т. п.).

Учитывая, что для построения численного стационарного решения используется метод установления (решается нестационарная задача на большом интервале времени), уравнения (1), (2) с краевыми условиями (3)–(5) дополняем начальным условием, точнее, начальным приближением

$$u|_{t=0} = u_0(y) = 4U_m \frac{(y-y_1)(y_{32}-y)}{y_{32}-y_1}, \quad w = 0, \quad x \leq x_*, \quad (8)$$

$$u|_{t=0} = U_0(y), \quad w = 0, \quad x > x_*,$$

где $U_0(y)$ – фоновая скорость течения (всюду постоянная, за исключением границы, на которой обращается в нуль; от выбора $U_0(y)$ зависит скорость сходимости метода установления); U_m – максимальная скорость течения Пуазейля; x_* – параметр, характеризующий «проникновение» течения Пуазейля внутрь области \mathbb{D} .

Решение методом конечных элементов

Для удобства изложения будем рассматривать задачу (1)–(5), (8) (для других краевых условий практически все построения аналогичны). Численное решение строим, используя метод конечных элементов [18, 19] и модификацию метода штрафов [15, 19]. Реализация алгоритма осуществляется при помощи пакета, точнее, среды программирования, FreeFem++ [20–22]. Слабая (вариационная) формулировка исходной задачи (1)–(5), (8) для каждого момента времени t_k после аппроксимации производных по времени выбирается в виде

$$I_k^v \equiv \iint_{\mathbb{D}} \left(\frac{\mathbf{v}^{k+1} - \mathbf{v}^k}{\tau} + \mathbf{v}^k \cdot \nabla \mathbf{v}^{k+1} \right) \cdot \mathbf{v} \, dx dy - \int_{\Gamma} P \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, d\Gamma + \quad (9)$$

$$+ \iint_{\mathbb{D}} (\nabla p^{k+1} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v}^{k+1} \cdot \nabla p + \mu \nabla \mathbf{v}^{k+1} : (\nabla \mathbf{v})^* - \beta p^{k+1} P) \, dx dy = 0,$$

$$\mathbf{v}^k = \mathbf{v}(x, y, t_k), \quad p^k = p(x, y, t_k), \quad t_k = k\tau,$$

$$\Gamma = \Gamma_{in} \cup \Gamma_{out}, \quad \Gamma_{in} = L_{32}, \quad \Gamma_{out} = L_4 \cup L_{11} \cup L_{16} \cup L_{21} \cup L_{28}.$$

Здесь \mathbf{v}^k, p^k – скорость и давление в момент времени t_k ; \mathbf{v}, P – тестовые (пробные) функции, удовлетворяющие однородным условиям для скорости (3)–(5); τ – шаг по времени; $\Gamma_{in}, \Gamma_{out}$ – входной и выходные участки границы $\partial\mathbb{D}$; $\nabla \mathbf{v}^{k+1} : (\nabla \mathbf{v})^*$ – свертка тензоров (градиента скорости $\nabla \mathbf{v}^{k+1}$ и сопряженного градиента тестовой функции $(\nabla \mathbf{v})^*$); \mathbf{n} – нормаль к границе Γ ; β – коэффициент штрафа (сжимаемость).

Функционал I_k^v соответствует методу штрафов [19] (или по другой терминологии – методу искусственной сжимаемости [15]). Дополнительный член $\beta p^{k+1} P$ является стабилизирующим, обеспечивающим устойчивость вычислений. Фактически член $\beta p^{k+1} P$ возникает в результате замены уравнения неразрывности $div \mathbf{v} = 0$ (2) уравнением $\beta p_t + div \mathbf{v} = 0$ (подробнее – в [15, 19]). Считается, что неизвестные функции \mathbf{v}^k, p^k удовлетворяют краевым условиям (3)–(5). При построении функционала использована полуявная схема. Конвективный член $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ аппроксимирован выражением $\mathbf{v}^k \cdot \nabla \mathbf{v}^{k+1}$, имеющим порядок точности $O(\tau)$. В принципе, можно применять и иные аппроксимации, в частности $\mathbf{v}^{k+1} \cdot \nabla \mathbf{v}^k$ или $0,5(\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v}^{k+1} \cdot \nabla \mathbf{v}^k)$, также имеющие точность $O(\tau)$.

Хорошо известно (строго доказано в [19]), что решение задачи в слабой формулировке, т.е. для функционала (9), сходится при $t_k \rightarrow \infty$ к стационарному решению исходной задачи (1)–(5) и, более того, дает решение нестационарной задачи (1)–(5), (8), что подтверждают многочисленные расчеты [14, 15, 19, 20]. Вычисления показывают, что поле скоростей \mathbf{v} , определенное методом штрафов, достаточно адекватно описывает течение жидкости. Однако поле давления p в жидкости вычисляется значительно менее точно, чем поле скоростей (по крайней мере, для рассматриваемой задачи протекания). В связи с этим уместна некоторая модификация метода, позволяющая (как показали расчеты) более точно находить поле давления p . Предлагается на каждом временном шаге решать задачу для коррекции давления, уравнение которой, очевидно, следует из уравнения (1) после применения к нему оператора div и учета (2)

$$\Delta p = -div(\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}) \equiv -\nabla \mathbf{v} : \nabla \mathbf{v} = -2(u_y w_x - u_x w_y). \quad (10)$$

Обычно [16, 17] уравнение (10) не рекомендуется использовать для определения давления. Во-первых, как правило, велика погрешность аппроксимации производных, содержащихся в правой части уравнения; во-вторых, достаточно трудно поставить корректные краевые условия для давления. Тем не менее в случае метода конечных элементов, в отличие от конечно-разностных методов, производные вычисляются непосредственно от базисных функций (конечные элементы), что существенно снижает погрешность. Слабая формулировка задачи для уравнения (10) (момент времени t_k) выбирается в виде

$$I_k^p \equiv \iint_{\mathbb{D}} (\nabla p \cdot \nabla q - q \nabla \mathbf{v} : \nabla \mathbf{v}) \, dx dy - \int_{\partial\mathbb{D}} \mu q \mathbf{n} \cdot \Delta \mathbf{v} \, d\partial\mathbb{D} = 0, \quad p|_{\Gamma_{in}} = 0. \quad (11)$$

Здесь q – тестовая функция; \mathbf{n} – нормаль к границе \mathbb{D} ; условие $p|_{\Gamma_{in}} = 0$ соответствует нормировке давления, которое определяется с точностью до постоянной величины.

Заметим, что подынтегральное выражение интеграла по границе в соотношении (11) – это $\mathbf{n} \cdot \nabla p$, полученное путем проектирования на нормаль к границе $\partial\mathbb{D}$ уравнения (1) с учетом краевых условий (3)–(5).

Функция тока и расход жидкости

Исходная задача (3)–(5) (в слабой формулировке – (9), (11)) решается для переменных скорость – давление, а не для переменных вихрь – функция тока. Иными словами, для непосредственного решения задачи функция тока не требуется. Однако ее удобно использовать для определения некоторых свойств решения задачи, в частности для визуализации течения при проведении вычислений.

Для определения функции тока имеем задачу:

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= u_y - w_x, \quad u = \psi_y, \quad w = -\psi_x, \\ \psi|_{\Gamma_{in}} &= \psi_0(y) = \int_{y_1}^y u_0(\tilde{y}) d\tilde{y} = -\frac{2}{3}U_m(2y - 3y_{32} + y_1)(y - y_1)^2, \\ \psi|_{\Gamma_{bot}} &= \psi_{bot} = 0, \quad \psi|_{\Gamma_{top}} = \psi_{top} = \psi_0(y_{32}) = \frac{2}{3}U_m(y_{32} - y_1)^3, \\ \psi|_{\Gamma_k} &= \psi_k = \sum_{i=1}^k Q_i, \quad Q_i = \int_{\Gamma_i} u(x, y) dy, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5. \\ \Gamma_1 &= L_4, \quad \Gamma_2 = L_{11}, \quad \Gamma_3 = L_{16}, \quad \Gamma_4 = L_{21}, \quad \Gamma_5 = L_{28}, \\ Q_{in} &= \int_{\Gamma_{in}} u(x, y) dy = \psi_{top} = \psi_5 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \end{aligned} \tag{12}$$

где ψ – функция тока; Γ_i – выходные участки границы; Q_{in} – расход жидкости на входном участке границы; Q_k – расход жидкости на выходном участке границы Γ_k ; U_m – максимальная скорость течения Пуазейля.

Результаты расчетов

Результаты вычислений описаны для трех типов краевых условий на выходных участках границы, т.е. для (5)–(7), но основное внимание уделено условиям (5). Вычисления представлены для области с одним входным и пятью выходными участками границы (рис. 1). Граница $\partial\mathbb{D}$ области \mathbb{D} состоит из отрезков линий $L_k = \{(1 - \theta)Z_k + \theta Z_{k+1}\}$, $0 \leq \theta \leq 1$, $Z_k = (x_k, y_k)$, и кривых Безье $L_k = \{(1 - \theta)^3 Z_k + 3(1 - \theta)^2 \theta Z_{kA} + 3(1 - \theta) \theta^2 Z_{kB} + \theta^3 Z_{k+1}\}$, $0 \leq \theta \leq 1$, задаваемых параметрическими уравнениями, где координаты точек $x_k, x_{kA}, x_{kB}, y_k, y_{kA}, y_{kB}$ указаны в табл. 1.

Течение в области \mathbb{D} (рис. 1) моделирует течение, например, в дельте реки (с постоянной глубиной стоков) или в разветвленных кровеносных сосудах. Отметим, что конфигурация области достаточно произвольна и не привязана ни к какой конкретной ситуации. Выбор входного и выходных каналов прямолинейными сделан для некоторого упрощения расчетов и не является принципиальным.

Значение максимальной скорости течения Пуазейля U_m на входном участке границы (4), (8) и вязкость жидкости μ выбраны:

$$U_m = 1, \quad \mu = 0,0025 \quad (Re = \mu^{-1} = 400). \tag{13}$$

Для расчетов применяется пакет FreeFem++ [20]. Практически изотропная триангуляция области \mathbb{D} содержит около 5000 треугольников с максимальным размером сторон $\approx 0,1$ (площадь области – примерно 10,71). Используются кусочно-квадратичные конечные элементы P2.

При решении нестационарной задачи (1)–(5) с начальным условием (8) выбран шаг по времени $\tau = 0,1$. На самом деле, ввиду того что разыскивается стационарное решение, условие (8) – это некоторое начальное приближение, а параметр τ является итерационным для метода установления. В частности, этим объясняется сравнительно большая величина параметра τ (при решении нестационарных задач шаг по времени обычно на один-два порядка меньше).

Таблица 1 / Table 1

Значения координат/ Coordinate values

k	$x_k; y_k$	$x_{kA}; y_{kA}$	$x_{kB}; y_{kB}$	k	$x_k; y_k$	$x_{kA}; y_{kA}$	$x_{kB}; y_{kB}$
1	0,0; 0,5	–	–	17	7,0; 0,4	–	–
2	1,5; 0,5	3,0; 0,5	1,3; 2,5	18	6,0; 0,4	5,5; 0,4	5,3; 0,4
3	3,5; 2,5	–	–	19	5,3; 0,7	5,3; 1,0	5,5,1,3
4	7,0; 2,5	–	–	20	6,0; 1,3	–	–
5	7,0; 2,1	–	–	21	7,0; 1,3	–	–
6	4,0; 2,1	3,0; 2,0	2,4; 1,7	22	7,0; 1,5	–	–
7	2,4; 0,8	2,4; 0,45	3,0; 0,3	23	5,5; 1,5	4,6; 1,5	5,5; 0,1
8	4,0; 0,3	2,4; 0,45	3,0; 0,3	24	4,2; 0,1	–	–
9	4,2; 0,3	5,7; 0,3	4,6; 0,95	25	3,5; 0,1	3,0; 0,1	2,3; 0,4
10	6,0; 0,95	–	–	26	2,3; 0,7	2,3; 1,2	3,1; 2,0
11	7,0; 0,95	–	–	27	3,6; 2,0	–	–
12	7,0; 0,7	–	–	28	7,0; 2,0	–	–
13	6,0; 0,7	5,5; 0,7	5,3; 0,5	29	7,0; 2,5	–	–
14	5,3; 0,2	5,3; 0,2	6,0; 0,2	30	3,5; 2,5	2,5; 2,5	2,3; 0,5
15	6,0; 0,2	–	–	31	1,5; 0,5	–	–
16	7,0; 0,2	–	–	32	0,0; 0,5	–	–

Некоторые характеристики проведенного численного решения задачи (1)–(5) с условием (8), в котором $U_0(y) = 0,33$, $x_* = 2$, приведены в табл. 2. Точность вычислений контролировалась удвоением количества треугольников триангуляции, а также при помощи соотношения (12)

$$\delta Q = 1 - \frac{1}{Q_{in}} \sum_{k=1}^5 Q_k, \tag{14}$$

где δQ – относительная разность расходов втекающей и вытекающей жидкости.

Сходимость итерационного процесса к стационарному решению для рассматриваемых значений параметров является сравнительно низкой и неравномерной. Величины δQ для 0, 50, 100, 200, 300 итераций, соответственно, равны 0,15; –0,016; –0,0067; –0,0024; –0,0020. Выбор параметра $x_* = 2$ (8) достаточно естествен – течение Пуазейля задается лишь на прямолинейном участке втекания жидкости в область. Значение $U_0(y) = 0,33$ влияет на скорость сходимости и выбрано на основе вычислительного эксперимента как некоторое оптимальное.

Вычисление соотношений

$$\delta_k = \frac{8\mu U_k}{\rho_{k,x} h_k^2} \tag{15}$$

показывает, что $\delta_k \approx 1$ с точностью до 0,03 % (табл. 2, часть, соответствующая условиям (5)). Это означает, что в выходных участках области (окрестность границ Γ_i) в стационарном случае устанавливается течение Пуазейля. Действительно, течение Пуазейля в прямолинейных каналах определяется соотношениями (из которых следует (15)):

$$u^k(x, y) = u_*^k (y - Y_k - h_k)(Y_k - y), \quad w^k(x, y) = 0, \quad k = 1, \dots, 5, \tag{16}$$

$$Y_1 = y_4, \quad Y_2 = y_{11}, \quad Y_3 = y_{16}, \quad Y_4 = y_{21}, \quad Y_5 = y_{28},$$

$$Q_k = \frac{1}{6} u_*^k h_k^3, \quad u_*^k = \frac{6Q_k}{h_k^3}, \quad U_k = \frac{3Q_k}{2h_k}, \quad \rho_{x,k} = \frac{12\mu Q_k}{h_k^3}. \tag{17}$$

Здесь Q_k – расход жидкости; U_k – максимальное значение скорости.

Вычисленные при помощи (17) и данных табл. 2 величины $\tilde{Q}_k = 2U_k h_k / 3$ совпадают с Q_k с точностью до 0,06 %.

Изолинии функций $\psi(x, y)$, $p(x, y)$, $u(x, y)$, $w(x, y)$ в случае краевых условий (5) показаны на рис. 2, профили скорости $u(x_k, y)$ в сечениях $x = x_k$ при $x_0 = 0, x_2 = 2, x_3 = 3, x_5 = 5, x_6 = 6, x_7 = 7$ – на рис. 3. В сечениях x_6, x_7 и в сечении x_5 в тех частях, которые соответствуют верхнему и нижнему

выходным каналам, профили скоростей практически совпадают и соответствуют течению Пуазейля, что подтверждает соотношение (15). Отрицательное значение скорости в сечении x_5 указывает на наличие вихря, который отчетливо виден на рис. 2 (I) в окрестности точки (5,0; 0,3).

В табл. 2 также указаны значения $\theta_k, \tilde{\theta}_k$, характеризующие распределение расхода жидкости и величину сечений участков границ Γ_i

$$\theta_k = \frac{Q_k}{Q_{in}}, \quad \tilde{\theta}_k = \frac{h_k}{\sum_i h_i}. \quad (18)$$

Таблица 2 / Table 2

Характеристики численного решения ($Q_k, U_k, p_k, p_{x,k}$) на входном участке Γ_{in} и выходных участках Γ_k границы для задачи (1)–(5), (8) / Characteristics of the numerical solution ($Q_k, U_k, p_k, p_{x,k}$) on the input section Γ_{in} and output sections Γ_k of the boundary for problem (1)–(5), (8)

Γ_k	Γ_{in}	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4	Γ_5
h_k	1,0	0,4	0,25	0,2	0,2	0,5
Крайевые условия (5)						
Q_k	0,66667	0,15432	0,11091	0,10414	0,09926	0,20010
\tilde{Q}_k	0,66667	0,15430	0,11090	0,10413	0,09925	0,20020
U_k	1,0	0,57862	0,66539	0,78097	0,74435	0,6006
$-p_k$	0	0,87907	2,00774	2,06847	2,36717	0,89790
$-p_{x,k}$	0,02	0,07228	0,21279	0,39025	0,37194	0,04803
θ_k	1	0,231	0,166	0,156	0,149	0,300
Крайевые условия (6)						
Q_k	0,66667	0,17204	0,10753	0,08602	0,08602	0,21505
U_k	1,0	0,64516	0,64516	0,64516	0,64516	0,64516
$-p_k$	0	0,82188	1,70723	1,68472	1,95077	0,85427
$-p_{x,k}$	0,02	0,08066	0,20647	0,32258	0,32259	0,05064
$\theta_k = \tilde{\theta}_k$	1	0,258	0,161	0,129	0,129	0,323
Крайевые условия (7)						
Q_k	0,66667	0,17042	0,13798	0,11580	0,07885	0,16354
U_k	1,0	0,63906	0,82792	0,86864	0,59173	0,49068
$-p_k$	0	0,71677	0,71677	0,71677	0,71677	0,71677
$-p_{x,k}$	0,02	0,07988	0,26336	0,42988	0,29451	0,03924
θ_k	1	0,256	0,207	0,174	0,118	0,245

Различие в указанных значениях в случае крайевых условий (5) составляет от 3 до 20 %. Скорее всего, оно обусловлено сложной внутренней конфигурацией области D . Однако привлекательно рассмотреть ситуацию, при которой значения θ_k и $\tilde{\theta}_k$ совпадают, т.е. профили скорости заданы соотношениями (16), (17), а расходы жидкости на выходных границах удовлетворяют условиям

$$Q_k = \frac{h_k Q_{in}}{\sum_i h_i}. \quad (19)$$

В этом случае все максимальные скорости, как это следует из (17), становятся одинаковыми

$$U_k = \frac{3Q_{in}}{2\sum_i h_i} \approx 0,645. \quad (20)$$

В табл. 2 показаны результаты расчетов для крайевых условий (6) (взамен (5)), что соответствует выполнению условий (19), (20). Анализ показал, что изолинии функций $\psi(x, y), p(x, y), u(x, y), w(x, y)$ мало отличаются от изолиний для случая (5). В частности, на левом и центральном рис. 4 для сравнения показаны профили скорости и изолинии давления $p(x, y)$. Максимальное различие результатов при поточечном сравнении функций не превышает 11 %.

Заметим, что с математической точки зрения задачу с крайевыми условиями (6) (взамен (5)) легче исследовать ввиду полной определенности, а также, как показал вычислительный эксперимент, для случая (6) сходимость решения к стационарному гораздо более быстрая, чем в случае (5). Конечно, на практике задавать какие-либо профили скорости на выходных участках границы довольно затруднительно, однако реализуемо, например при помощи специальных турбин.

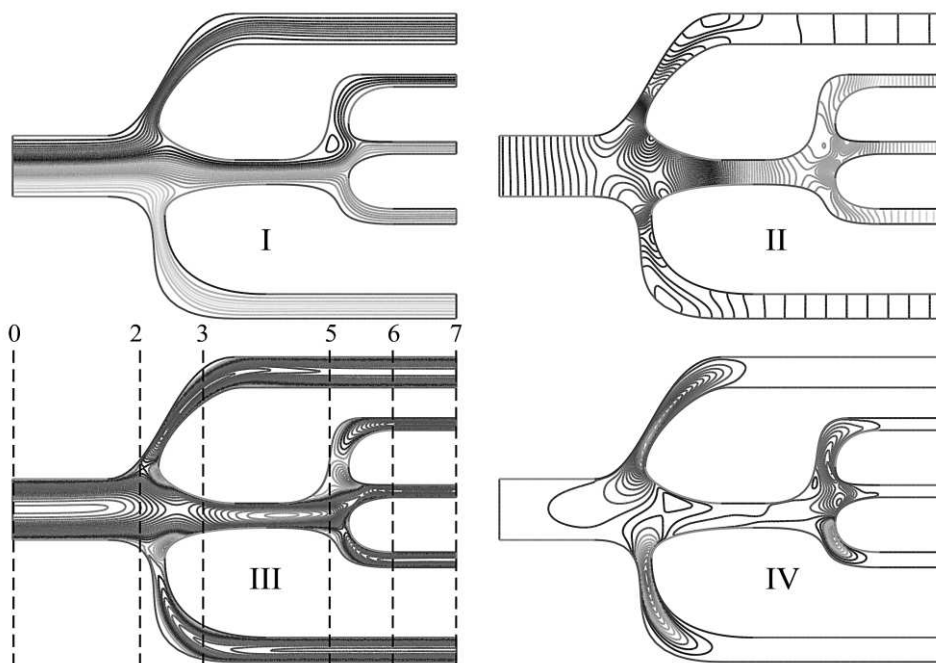


Рис. 2. Изолинии функций: I – $\psi(x, y)$; II – $p(x, y)$; III – $u(x, y)$; IV – $w(x, y)$. Каждый рисунок содержит 30 равномерно отстоящих изолиний, соответственно, на интервалах $[0; 0,667]$, $[-2,0; 0]$, $[-0,4; 1,0]$, $[-1,2; 1,4]$. Пунктирные линии на III указывают сечения $x = x_k$, для которых на рис. 3 показаны профили скорости $u(x_k, y)$ / Fig. 2. Isolines of functions: I – $\psi(x, y)$; II – $p(x, y)$; III – $u(x, y)$; IV – $w(x, y)$. Each figure contains 30 evenly spaced isolines, respectively, at the intervals $[0;0.667]$, $[-2.0; 0]$, $[-0.4; 1.0]$, $[-1.2; 1.4]$. The dotted lines in III indicate the sections $x = x_k$, for which in Fig. 3 shows the velocity profiles $u(x_k, y)$

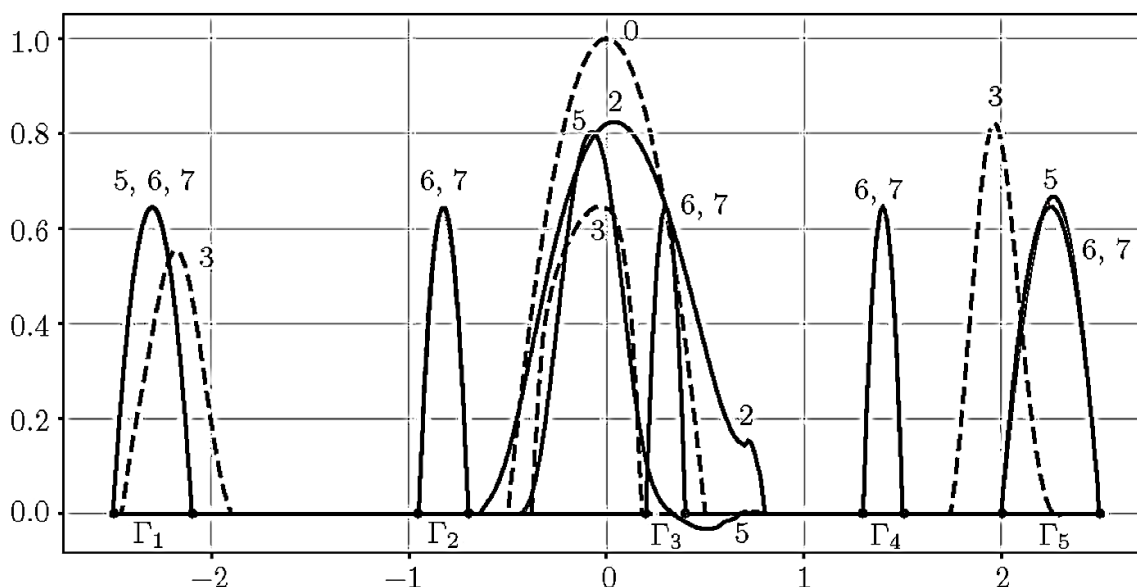


Рис. 3. Профили скорости $u(x_k, y)$ в точках $x_0 = 0, x_2 = 2, x_3 = 3, x_5 = 5, x_6 = 6, x_7 = 7$ / Fig. 3. Velocity profiles $u(x_k, y)$ at points $x_0 = 0, x_2 = 2, x_3 = 3, x_5 = 5, x_6 = 6, x_7 = 7$

Напомним, что результаты расчетов для краевых условий (5) и (6) получены методом штрафов. Модификация метода (10), (11) позволила рассчитать поле давления с высокой точностью. Значения давления p_k и градиентов давления $p_{x,k}$ приведены в табл. 2.

Попытка применить для расчетов метод расщепления в случае краевых условий (5) и (6) показала, что такой метод имеет скорость сходимости меньшую, чем метод штрафов, и очень чувствителен к выбору начального приближения вида (8). В частности, неудачный выбор фоновой скорости $U_0(y)$ приводит к вычислительной неустойчивости.

Расчеты методом расщепления

Вычислительный эксперимент показал, что в случае краевых условий (7), т.е. при задании величин давления p_k на выходных участках границы и для одинаковых p_k , соответствующих вытеканию жидкости в область с заданным постоянным давлением (водоем, крупный сосуд), метод штрафов даже при его модификации дает плохие результаты – численно неустойчив, плохо сходится к стационарному решению, сильно зависит от выбора фоновой скорости $U_0(y)$ в начальном приближении (8). Напротив, плохо работающий в случаях условий (5) и (6) метод расщепления для условий (8) демонстрирует хорошие результаты. Более того, метод расщепления позволяет для условий (8) получить численное решение нестационарной задачи, т.е. проследить весь процесс эволюции решения при его стремлении к стационарному, в частности при начальных условиях (8) с фоновой скоростью $U_0(y) = 0$. Фактически удается построить решение задачи о «внедрении» через входную границу течения Пуазейля в область с первоначально неподвижной жидкостью. Как и в случаях (5) и (6), для условий (7) в окрестности (довольно большой) выходных границ входное течение Пуазейля (8) вновь индуцирует аналогичные течения (16), (17).

Существуют различные варианты метода расщепления. Для вычислений использован исходный вариант [24] (см. также схему MAC в [17, с. 400–402] и метод проекций в [21, с. 100, 101]), отличный от приведенного в [15, с. 132–135]. Задача (1)–(4), (7), (8) решалась при помощи алгоритма, который для t_m временного шага имеет вид

$$\frac{\mathbf{v}^* - \mathbf{v}^m}{\tau} + \mathbf{v}^m \cdot \nabla \mathbf{v}^* = -\nabla p^m + \mu \Delta \mathbf{v}^*, \quad \mathbf{v}^{m+1} = \mathbf{v}^* - \tau q, \quad p^{m+1} = p^m + q, \quad (21)$$

где поправка q к давлению и промежуточной скорости \mathbf{v}^* вычислялась при помощи решения задачи, вытекающей из требования $\text{div } \mathbf{v}^{m+1} = 0$,

$$\Delta q = \frac{\text{div } \mathbf{v}^*}{\tau}, \quad q(x, y)|_{\Gamma_k} = 0, \quad (\mathbf{n} \cdot \nabla q(x, y))|_{\Gamma_k} = 0. \quad (22)$$

Здесь считалось, что давление на границах Γ_k одинаковое и равно нулю.

Результаты расчетов приведены в табл. 2 (для условий (7)) и на правом рис. 4. Расчеты дают для входной границы значение давления $p_{in} = 0,71677$. Напомним, что при решении задач с краевыми условиями (5), (6) полагалось $p_{in} = 0$. Учитывая, что давление определено с точностью до постоянной, для согласования данных таблицы в случае краевых условий (7) использована замена $p \rightarrow p - 0,71677$.

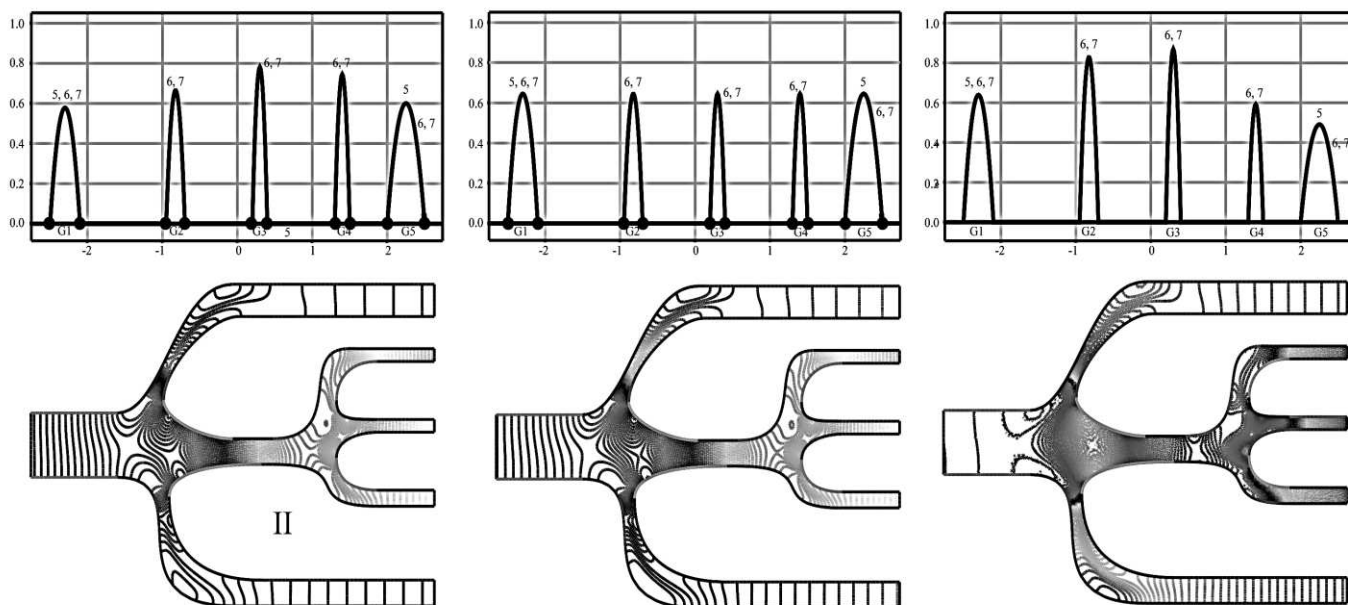


Рис. 4. Профили скорости $u(x_k, y)$ в точках $x_0 = 0, x_2 = 2, x_3 = 3, x_5 = 5, x_6 = 6, x_7 = 7$ (рис. 3) и изолинии давления $p(x, y)$: слева – для краевых условий (5), в центре – (6), справа – (7) / Fig. 4. Velocity profiles $u(x_k, y)$ at points $x_0 = 0, x_2 = 2, x_3 = 3, x_5 = 5, x_6 = 6, x_7 = 7$ (Fig. 3) and pressure contours $p(x, y)$: left - for boundary conditions (5), in the center - (6), right - (7)

Задача (21), (22) была преобразована к слабой формулировке типа (9), (11) и решалась методом конечных элементов.

Метод расщепления позволил решить нестационарную задачу (т.е. это не итерационный процесс). Приведенные в табл. 2 и на правом рис. 4 результаты соответствуют моменту времени $t = 100$. Установление стационарного режима происходит примерно к моменту времени $t = 10$. Течение Пуазейля от входной границы проникает в область, и его структура, как показывает, в частности, табл. 2, несущественно отличается от ситуаций, когда в качестве краевых условий выбирались (5) или (6). Заметное отличие наблюдается лишь в распределении давления $p(x, y)$ (рис. 4).

Заключение

Представленные результаты показывают, что для краевых условий (5), (6) предпочтительно использовать метод штрафов, для условия (7) более эффективным оказывается метод расщепления. Важным результатом следует считать тот факт, что входное течение Пуазейля индуцирует в окрестности выходных участков границы аналогичные течения Пуазейля (естественно, с другими параметрами). Следует также отметить, что, несмотря на то что краевые условия на выходных границах различны (задана неизменяемость движения частиц жидкости – (5), фактически это продолжение прямолинейных каналов, заданы профили скорости (6), давления (7)), структура течения и интегральные характеристики, как показывают данные табл. 2 и рис. 4, мало изменяются.

Список источников

1. Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. СПб.: РГГМУ, 2007. 314 с.
2. Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. М.: Мир, 1983. 400 с.
3. Овсянников Л.В., Макаренко Н.И., Налимов В.И., Ляпидевский В.И., Плотников П.И., Стурова И.В., Букреев В.И., Владимиров В.А. Нелинейные проблемы теории поверхностных и внутренних волн. Новосибирск: Наука, 1985. 319 с.
4. Кочин М.Е. Об одной теореме существования гидродинамики // ПММ. 1957. Т. 20, № 10. С. 5–20.
5. Юдович В.И. Нестационарные течения идеальной несжимаемой жидкости // ЖВМ МФ. 1963. Т. 3, № 6. С. 1032–1066.
6. Юдович В.И. О задаче протекания идеальной несжимаемой жидкости через заданную область // Докл. АН СССР. 1962. Т. 146, № 3. С. 561–564.
7. Юдович В.И. Двумерная нестационарная задача о протекании идеальной несжимаемой жидкости через заданную область // Мат. сб. 1964. Т. 64, № 4. С. 562–588.
8. Моргулис А.Б., Юдович В.И. Асимптотическая устойчивость стационарного режима протекания идеальной несжимаемой жидкости // Сиб. мат. журн. 2002. Т. 43, № 4. С. 840–857.
9. Моргулис А.Б. Разрешимость трехмерной стационарной задачи протекания // Сиб. мат. журн. 1999. Т. 40, № 1. С. 142–158.
10. Трошкин О.В. Вихревые фантомы в стационарной задаче о протекании Кочина – Юдовича // ЖВМ МФ. 2021. Т. 61, № 4. С. 684–688.
11. Говорухин В.Н. О возникновении автоколебаний при протекании идеальной жидкости через канал // ЖВМ МФ. 2019. Т. 59, № 6. С. 1024–1036.
12. Гуммель Е.Э., Захаров Ю.Н. Нестационарная задача протекания в разветвлённых каналах // Вестн. КемГУ. 2012. Т. 2, № 4 (52). С. 49–54.
13. Кузнецов Б.Г., Мошкин Н.П., Смагулов Ш. Численное исследование течения вязкой несжимаемой жидкости в каналах при заданных перепадах давлений // Численные методы динамики вязкой жидкости: сб. ИТПМ СО АН СССР. Новосибирск, 1983. С. 203.
14. Moshkin N., Yambangwi D. Steady viscous incompressible flow driven by a pressure difference in a planar T-junction channel // Int. J. Comput. Fluid Dyn. 2009. Vol. 23, № 3. P. 259–270.
15. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.
16. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.
17. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. 2. 552 с.
18. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. М.: Наука, 1981. 416 с.
19. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ. М.: Мир, 1981. 408 с.

20. Hecht F. New development in FreeFem++ // *J. Numer. Math.* 2012. Vol. 20, № 3–4. P. 251–256.
21. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Решение задач математической физики при помощи пакета конечных элементов FreeFem++. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2008. 256 с.
22. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Решение задач математической физики при помощи пакета конечных элементов FreeFem++. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2014. 256 с.
23. Жуков М.Ю., Ширяева Е.В. Микрогидродинамика, жидкие пленки и электрофорез. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2015. 240 с.
24. Chorin A. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems // *J. Comput. Phys.* 1967. Vol. 2. P. 12–26.
25. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика. М.: Наука, 1986. Т. 6. 736 с.

References

1. Baryshnikov N.B. *Dynamics of channel flows*. S. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University Press; 2007. 314 p. (In Russ.).
2. Pedley T.J. *The fluid mechanics of large blood vessels*. Moscow: Mir Publ.; 1983. 400 p. (In Russ.).
3. Ovsyannikov L.V., Makarenko N.I., Nalimov V.I., Lyapidevsky V.I., Plotnikov P.I., Sturova I.V., Bukreev V.I., Vladimirov V.A. *Nonlinear problems of the theory of surface and internal waves*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1985. 319 p. (In Russ.).
4. Kochin M.E. On one theorem of the existence of hydrodynamics. *PMM = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1957;20(10):5-20. (In Russ.).
5. Yudovich V.I. Unsteady flows of an ideal incompressible fluid. *ZHVM MF = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1963;3(6):1032-1066. (In Russ.).
6. Yudovich V.I. On the problem of the flow of an ideal incompressible fluid through a given region. *Dokl. AN SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1962;146(3):561-564. (In Russ.).
7. Yudovich V.I. Two-dimensional unsteady problem of the flow of an ideal incompressible fluid through a given region. *Mat. sb. = Mathematics*. 1964;64(4):562-588. (In Russ.).
8. Morgulis A.B., Yudovich V.I. Asymptotic stability of the stationary regime of the flow of an ideal incompressible fluid. *Sib. mat. zhurn. = Siberian Mathematical Journal*. 2002;43(4):840-857. (In Russ.).
9. Morgulis A.B. Solvability of a three-dimensional stationary flow problem. *Sib. mat. zhurn. = Siberian Mathematical Journal*. 1999;40(1):142-158. (In Russ.).
10. Troshkin O.V. Vortex phantoms in the stationary Kochin-Yudovich flow problem. *ZHVM MF = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2021;61(4):684-688. (In Russ.).
11. Govorukhin V.N. On the occurrence of self-oscillations during the flow of an ideal fluid through a channel. *ZHVM MF = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2019;59(6):1024-1036. (In Russ.).
12. Gummel E.E., Zakharov Yu.N. Unsteady problem of flow in branched channels. *Vestn. KemGU = Bulletin of KemSU*. 2012;2(4):49-54. (In Russ.).
13. Kuznetsov B.G., Moshkin N.P., Smagulov Sh. Numerical investigation of the flow of a viscous incompressible fluid in channels at given pressure drops. *Numerical methods of viscous fluid dynamics*. Novosibirsk: ITPM SB AS USSR. 1983:203. (In Russ.).
14. Moshkin N., Yambangwi D. Steady viscous incompressible flow driven by a pressure difference in a planar T-junction channel. *Int. J. Comput. Fluid Dyn.* 2009;23(3):259-270.
15. Belotserkovsky O.M. *Numerical modeling in continuum mechanics*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 520 p. (In Russ.).
16. Roache P. J. *Computational fluid dynamics*. Moscow: Mir Publ.; 1980. 618 p. (In Russ.).
17. Fletcher K. *Computational methods in fluid dynamics*. Moscow: Mir Publ.; 1991. Vol. 2. 552 p. (In Russ.).
18. Marchuk G.I., Agoshkov V.I. *Introduction to projection-grid methods*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. 416 p. (In Russ.).
19. Temam R. *Navier-Stokes equations. Theory and numerical analysis*. Moscow: Mir Publ.; 1981. 408 p. (In Russ.).
20. Hecht F. New development in FreeFem++. *J. Numer. Math.* 2012;20(3-4):251-256.
21. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. *Solving problems of mathematical physics using the FreeFem++ finite element package*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 256 p. (In Russ.).
22. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. *Solving problems of mathematical physics using the FreeFem++ finite element package*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2014. 256 p. (In Russ.).
23. Zhukov M.Yu., Shiryayeva E.V. *Microhydrodynamics, liquid films, and electrophoresis*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2015. 240 p. (In Russ.).

24. Chorin A. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems. *J. Comput. Phys.* 1967;2:12-26.

25. Landau L.D., Lifshic E.M. *Hydrodynamics. Theoretical physics*. Moscow: Nauka Publ.; 1986. Vol. 6. 736 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.В. Ширяева – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

А.С. Шокарева – бакалавр, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

В.П. Сибиль – аспирант, кафедра вычислительной математики и математической физики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

E.V. Shiryayeva - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, I.I. Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

A.S. Shokareva - Bachelor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

V.P. Sibil - Postgraduate Student, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

Статья поступила в редакцию 25.07.2023; одобрена после рецензирования 19.08.2023; принята к публикации 19.02.2024.

The article was submitted 25.07.2023; approved after reviewing 19.08.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Original article

UDC 519.2

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-56-62

PARAMETERS ESTIMATES ON SAMPLES WITH CONTAMINATION

Keyu Yao

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
iao@sfedu.ru

Abstract. Parametric estimates based on contaminated samples are considered in the paper. The paper provides an overview of algorithms for estimating the mean and the variance for a one-dimensional sample, as well as estimating the mean vector and the covariance matrix for a multidimensional sample. The paper uses the Minimal Covariance Determinant (MCD) algorithm adapted for one-dimensional sample and the MCD algorithm for multidimensional sample. The parameters are estimated on a subsample, the size of which is determined by a given confidence probability. Examples for samples with different levels of contamination are considered. In both examples, the sample was a union of two subsamples. The first subsample, the main one, was generated by normal distribution laws. The second subsample, auxiliary, was generated by different distribution laws. The examples demonstrate the dependence of the estimation accuracy on the confidence level and contamination. The figures illustrate the operation of the MCD algorithm. The main idea of the paper is to show the robustness of the MCD algorithm.

Keywords: confidence probability, sample with contamination, MCD algorithm

For citation: Yao Keyu. Parameters Estimates on Samples with Contamination. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):56-62. (In Russ.).

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

Научная статья

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПО ЗАСОРЕННЫМ ВЫБОРКАМ

Кэюй Яо

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
iao@sfedu.ru

Аннотация. Рассмотрены параметрические оценки по засоренным выборкам. Представлен обзор алгоритмов оценки среднего и дисперсии по одномерной выборке, а также оценки вектора среднего и ковариационной матрицы по многомерной выборке. Для этого используются алгоритм Minimal Covariance Determinant (MCD), адаптированный к одномерной выборке, и алгоритм MCD для многомерной выборки. Параметры оцениваются на подвыборке, объем которой определяется заданной доверитель-

ной вероятностью. Рассмотрены примеры для выборок с разным уровнем засоренности. В обоих примерах выборка являлась объединением двух подвыборок. Первая подвыборка (основная) порождалась нормальными законами распределения, вторая подвыборка (вспомогательная) – иными законами распределения. На примерах продемонстрирована зависимость точности оценки от доверительной вероятности и засоренности. На рисунках показана работа алгоритма MCD. Основная идея статьи – показать надежность алгоритма MCD.

Ключевые слова: доверительная вероятность, засоренная выборка, алгоритм MCD

Для цитирования: Yao Keyu. Parameters Estimates on Samples with Contamination // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 56–62.

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

Introduction

Let us assume that the confidence probability α and the sample $V = \{\rho_i\}_{i=1}^N$ are given. In this case the subsample for evaluation the parameters will contain $L = \lceil \alpha|V| \rceil + 1$ the elements of the sample. The choice of parameter L and subspace play a key role. In the paper various models of contamination are considered, in which the main generator is the normal law with known parameters, and using numerous examples, a connection is established between L and estimates of the parameters of the normal law based on a contaminated sample.

One-dimensional MCD algorithm

The problem is to choose the subsample of given volume on which sample variance will be minimal.

Algorithm

0 step. To choose in arbitrary way initial subsample H volume L .

t step. To evaluate sample mean m and sample variance σ of H . Sort elements of sample V in descending order of values $(\rho_i - m)^2$. To construct subsample H_1 containing the first L elements of the sample V . To evaluate sample mean m_1 and sample variance σ_1 of H_1 .

Stopping condition. If $\sigma_1^2 < \sigma^2$, then $H := H_1$, return to t step; else stop.

Theorem 1. Algorithm is monotone and converges in a finite number of steps to a local minimum of the objective function.

Example 1. Let us consider a sample V size $|V| = 300$, consisting of normal random variables with given variance $\sigma^2 = 1$ and average $m = 0$. The sample is contaminated with independent random variables, that have a uniform distribution on $[-1, 2]$. Calculate sample mean and sample variance (table 1).

I. Contamination is equal 10 %. Sample mean – 0.080 and sample variance – 0.935.

II. Contamination is equal 15 %. Sample mean – 0.103 and sample variance – 0.904.

III. Contamination is equal 20 %. Sample mean – 0.140 and sample variance – 0.871.

From table 1 we can conclude, that \bar{m} and $\bar{\sigma}$ tends to real values of parameters when confidence probability is closely to contamination level.

Table 1

Dependence of $\bar{m}, \bar{\sigma}$ on α / Зависимость $\bar{m}, \bar{\sigma}$ от α

α	$\bar{m}; \bar{\sigma}$		
	I	II	III
	Pollution, %		
	10	15	20
0.5 ($L=151$)	0.071; 1.003	0.073; 0.951	0.135; 1.032
0.7 ($L=211$)	0.012; 0.996	0.023; 0.959	0.129; 1.022
0.9 ($L=271$)	0.004; 1.001	0.007; 1.011	0.021; 0.983

Multidimensional MCD algorithm

The problem is to choose the subsample of given volume on which the determinant of the sample covariance matrix will be minimal. An exact solution of this problem requires a complete search of options, so the MCD algorithm is used [1–4].

Let us assume that a confidence probability α and a sample $V = \{\mathbf{p}_i\}_{i=1}^N$, consisting of M -dimensional vectors are given.

Let H_1 – a subsample of a sample V with $|H_1| = L$. Let us calculate the sample vector of means $\mathbf{m}(H_1)$ and the sample covariance matrix $\mathbf{C}(H_1)$ for this sample. Let us form an ordered permutation π

$$\pi(i) \prec \pi(j) \Leftrightarrow \left(\mathbf{C}^{-1}(H_1) (\mathbf{p}_{\pi(i)} - \mathbf{m}(H_1)), \mathbf{p}_{\pi(i)} - \mathbf{m}(H_1) \right) \leq \left(\mathbf{C}^{-1}(H_1) (\mathbf{p}_{\pi(j)} - \mathbf{m}(H_1)), \mathbf{p}_{\pi(j)} - \mathbf{m}(H_1) \right)$$

Based on the subsample H_1 a subsample $H_2 = \{\mathbf{p}_{\pi(i)} : i = 1, \dots, L\}$ is formed.

MCD algorithm

1. Select an initial subsample H_1 with $|H_1| = L$.
2. The sample vector of means $\mathbf{m}(H_1)$ and the sample covariance matrix $\mathbf{C}(H_1)$ are calculated. An ordered permutation π is found.
3. A subsample H_2 is selected.
4. If $\Delta\mathbf{C}(H_1) > \Delta\mathbf{C}(H_2)$, then $H_1 := H_2$, go to step 2; otherwise stop.

We obtained a subsample H_1 with $|H_1| = L$, a sample vector of means $\mathbf{m}(H_1)$ and a sample covariance matrix $\mathbf{C}(H_1)$.

Example 2. Consider a sample V volume $|V| = 300$, consisting of two-dimensional normal vectors with a given covariance matrix $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0.10 & 0.05 \\ 0.05 & 0.20 \end{pmatrix}$ and a given vector of mean values $\mathbf{m} = \begin{pmatrix} 0.20 \\ 0.15 \end{pmatrix}$. The sample is contaminated with two-dimensional vectors with independent components uniformly distributed on a segment $[-\sqrt{3}, \sqrt{3}]$. Bellow we will use Euclidian distance for vectors and Frobenius distance for matrices.

I. Contamination is equal 10 %. Distance between \mathbf{m} and sample mean $\bar{\mathbf{m}}$, $d_e(\mathbf{m}, \bar{\mathbf{m}}) = 0.075$, distance between matrix \mathbf{C} and sample covariance matrix $\bar{\mathbf{C}}$, $d_f = 0.081$.

II. Contamination is equal 15 %. Distance between \mathbf{m} and sample mean $\bar{\mathbf{m}}$, $d_e(\mathbf{m}, \bar{\mathbf{m}}) = 0.085$, distance between matrix \mathbf{C} and sample covariance matrix $\bar{\mathbf{C}}$, $d_f = 0.091$.

III. Contamination is equal 20 %. Distance between \mathbf{m} and sample mean $\bar{\mathbf{m}}$, $d_e(\mathbf{m}, \bar{\mathbf{m}}) = 0.102$, distance between matrix \mathbf{C} and sample covariance matrix $\bar{\mathbf{C}}$, $d_f = 0.108$. The results are presented in the table 2.

From table 2 we can conclude, that Euclidian and Frobenius distances between real and estimated values of parameters decrease when confidence probability is closely to contamination level.

Figures 1, 2 illustrate the operation of the MCD algorithm for the sample contaminated by 10 %, for $\alpha = 0.5$, $\alpha = 0.7$, $\alpha = 0.9$.

In fig. 1 contaminated sample elements are marked in red, and original sample elements are marked in black.

Table 2

Dependence of distances on α / Зависимость расстояний от α

α	$d_e; d_f$		
	I	II	III
	Pollution, %		
	10	15	20
0.5 ($L=151$)	0.051; 0.037	0.078; 0.057	0.084; 0.067
0.7 ($L=211$)	0.048; 0.011	0.056; 0.043	0.065; 0.053
0.9 ($L=271$)	0.016; 0.009	0.023; 0.013	0.037; 0.026

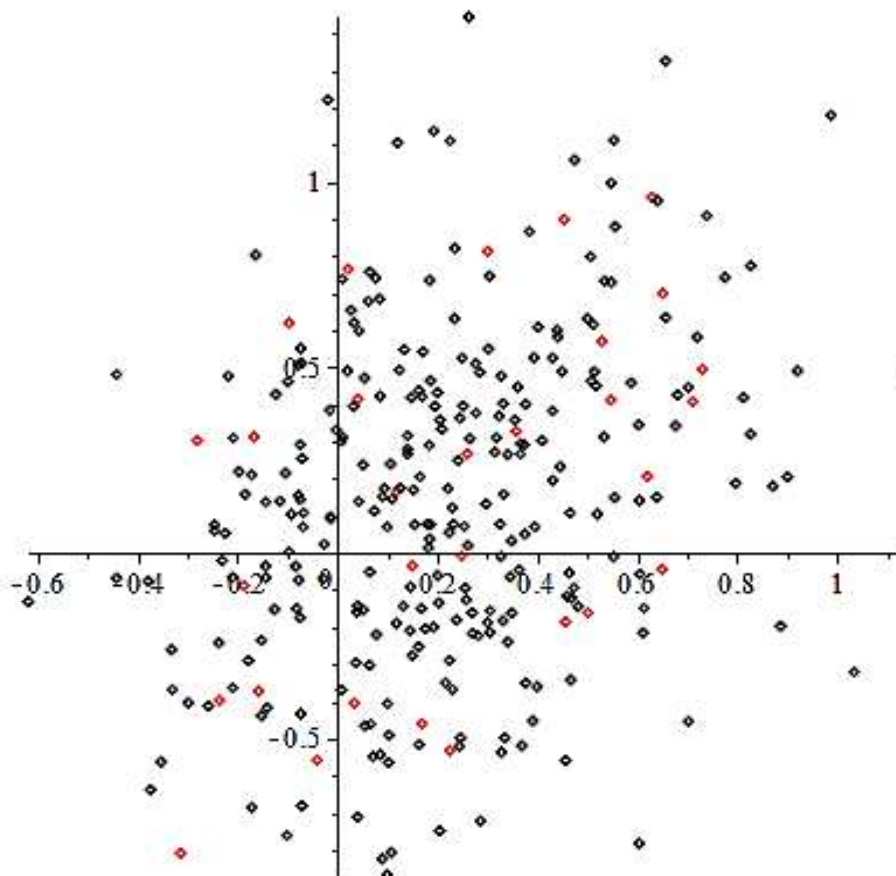
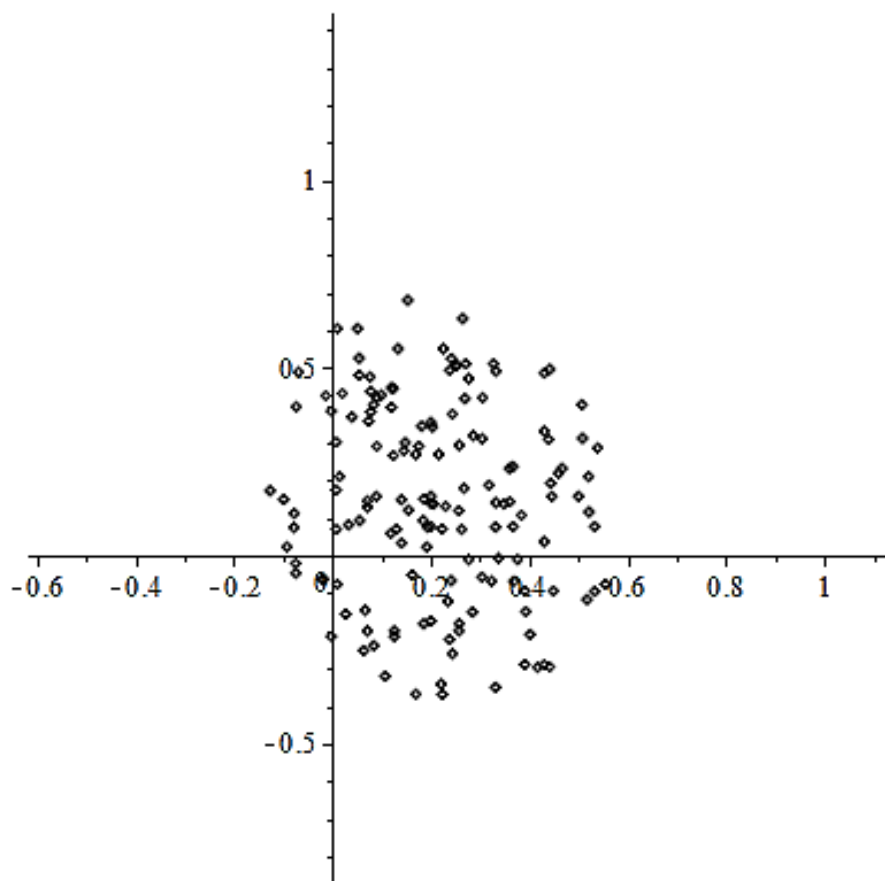
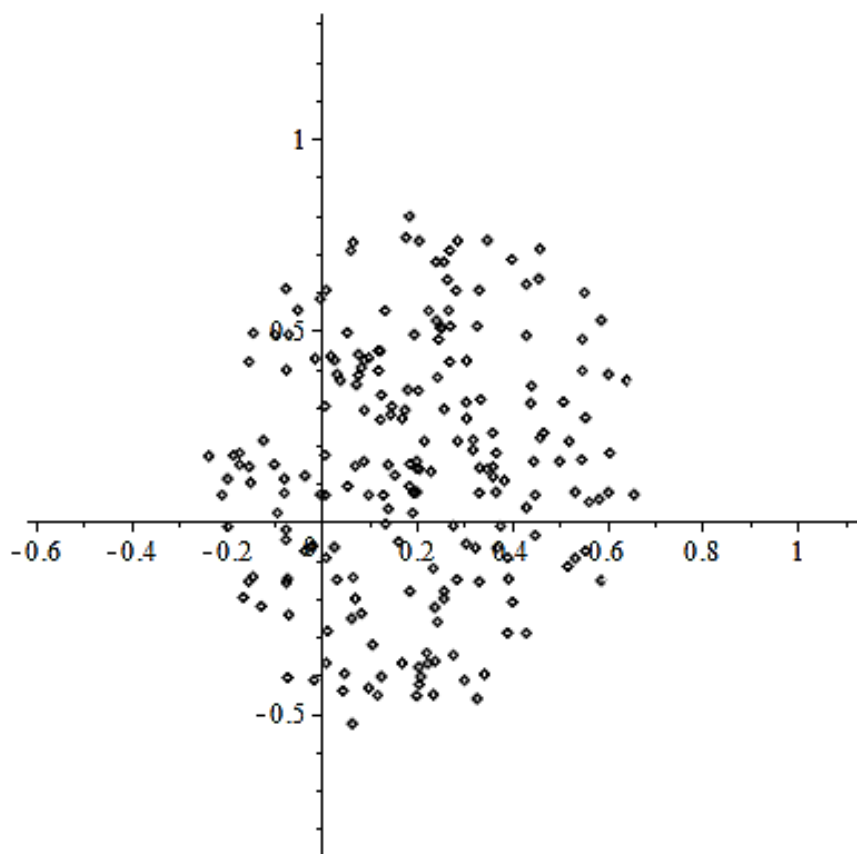


Fig. 1. Illustration of the sample contaminated by 10 % / Рис. 1. Иллюстрация выборки, засоренной на 10 %



a/a



b/b

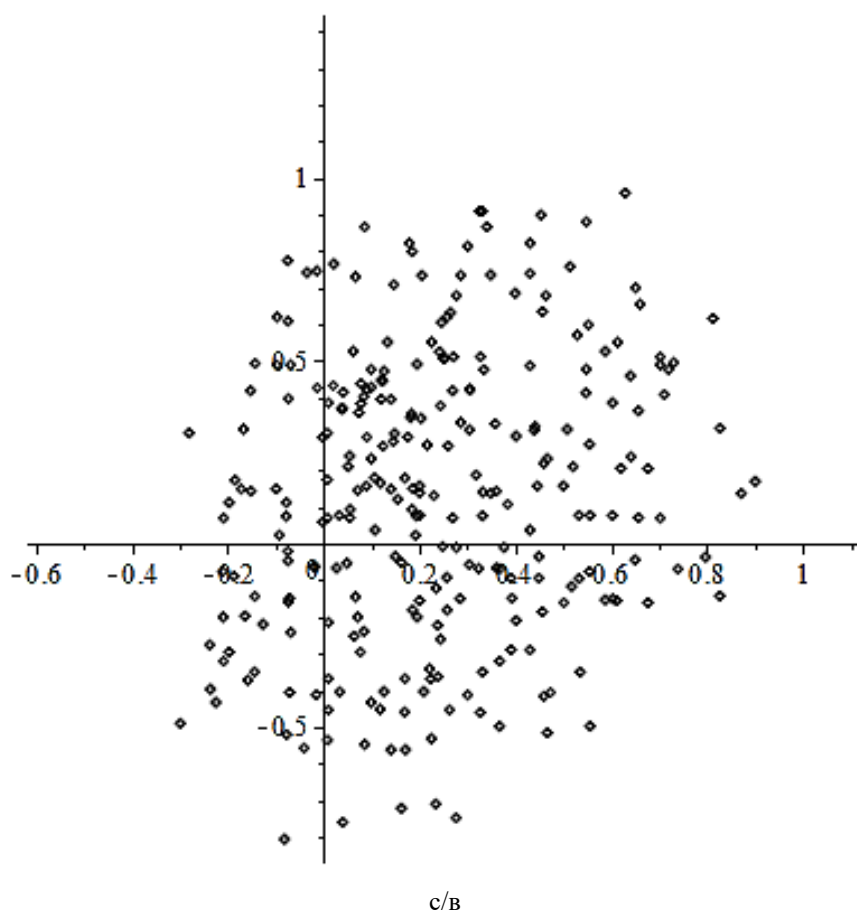


Fig. 2. Illustration of MCD algorithm (the sample is 10 % contaminated): a - $\alpha=0.5$; b - $\alpha=0.7$; c - $\alpha=0.9$ /
Рис. 4. Иллюстрация работы алгоритма MCD (выборка засорена на 10 %): а - $\alpha=0,5$; б - $\alpha=0,7$; в - $\alpha=0,9$

Conclusion

In the paper examples of robust evaluation [5] of parameters on contaminated samples are presented. The main algorithm used in this work is the MCD algorithm. Other robust estimation methods can be found in [6, 7]. The MCD algorithm has shown stability in relation to the level of sample contamination and can be recommended as a means of solving problems of this kind. The tables below show the dependence of the error on the confidence level. The figures illustrate the operation of the MCD algorithm.

References

1. Rousseeuw P., Van Driessen K. A fast algorithm for the minimum covariance determinant estimator. *Technometrics*. 1999;41:212-223.
2. Hubert M., Debruyen M., Rousseeuw J. Minimum covariance determinant and extension. *Arxiv*: 2017:1709.07045v [stat.ME].
3. Boudt K., Rousseeuw P., Vanduffel S., Verdonck T. The minimum regularized covariance determinant estimator. *Statistics and Computing*. 2019;30:113-128.
4. Sun P., Freud R. Computation of minimum-volume covering ellipsoids. *Operations Research*. 2004;52(5):690-706.
5. Hampel F. A general qualitative definition of robustness. *Annul of Mathematical Statistics*. 1971;42:1887-1896.
6. Beliaevsky G., Danilova N., Logunov A. Robust estimation of European and Asian options. *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*. 2021;357:101-117.
7. Danilova N., Yao K. The minimal ellipsoid and robust methods in the optimal portfolio problem. *Engineering Letters*. 2022;30(4):1465-1469.

Список источников

1. Rousseeuw P., Van Driessen K. A fast algorithm for the minimum covariance determinant estimator // *Technometrics*. 1999. Vol. 41. P. 212–223.
2. Hubert M., Debruyen M., Rousseeuw J. Minimum covariance determinant and extension // *Arxiv*. 2017. 1709.07045v [stat.ME].
3. Boudt K., Rousseeuw P., Vanduffel S., Verdonck T. The minimum regularized covariance determinant estimator // *Statistics and Computing*. 2019. Vol. 30. P. 113–128.
4. Sun P., Freud R. Computation of minimum-volume covering ellipsoids // *Operations Research*. 2004. Vol. 52 (5). P. 690–706.
5. Hampel F. A general qualitative definition of robustness // *Annul of Mathematical Statistics*. 1971. Vol. 42. P. 1887–1896.
6. Beliavsky G., Danilova N., Logunov A. Robust estimation of European and Asian options // *Springer proceedings in mathematics and statistics*. 2021. Vol. 357. P. 101–117.
7. Danilova N., Yao K. The minimal ellipsoid and robust methods in the optimal portfolio problem // *Engineering Letters*. 2022. Vol. 30, № 4. P. 1465–1469.

Information about the author

K. Yao - Postgraduate Student, High Mathematics and Operations Research Department, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

Информация об авторе

К. Яо – аспирант, кафедры высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

*Статья поступила в редакцию 25.07.2023; одобрена после рецензирования 15.08.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 25.07.2023; approved after reviewing 15.08.2023; accepted for publication 19.02.2024.*

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 911.2:556.11

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-63-75

ПОДЗЕМНЫЕ ИСТОЧНИКИ БАЛКИ ПЕЩЕРНАЯ ОЗЕРА БАСКУНЧАК: ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭМИССИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Д.Н. Гарькуша^{1✉}, Ю.А. Федоров², Е.А. Ковалев³, Б.В. Талпа⁴, Ю.А. Андреев⁵, Н.С. Тамбиева⁶,
Е.А. Краснова⁷

^{1, 2, 3, 4} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

^{5, 6} Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, Россия

⁷ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁷ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

¹gardim1@yandex.ru✉

²fedorov@sfedu.ru

³evkova@sfedu.ru

⁴talpabv@gmail.com

⁵y.andreev@gidrohim.mecom.ru

⁷e.krasnova@oilmsu.ru

Аннотация. Впервые для источников подземных вод, разгружающихся в долине ручья балки Пещерная, расположенной на северо-западе озера Баскунчак, в летний период проведены натурные измерения эмиссии метана и диоксида углерода камерным методом. В воде источников определены значения pH, концентрации CH_4 , основных ионов, валовых Fe и Mn; в различных слоях донных отложений (до 27 см) – концентрации CH_4 , H_2S , $\text{C}_{\text{орг}}$, значения Eh и pH, плотность и влажность. Выполнено детальное описание выявленных источников подземных вод, измерены их первичные морфометрические и морфологические характеристики, а также дебит. Установлено, что в балке Пещерная разгружаются более 10 восходящих карстовых источников подземных вод, 5 из которых в период исследований были активны и в основном приурочены к левому отверстию балки. Действующие источники левого отверстия балки характеризуются небольшим дебитом и представляют собой хлоридно-натриевые рассолы с минерализацией 93,9–107,1 г/л. Для донных отложений, накапливающихся в карстовых воронках подземных источников, характерны нейтральная кислотно-щелочная среда и восстановительные условия. Концентрации CH_4 и $\sum\text{H}_2\text{S}$ в отложениях источников изменялись, соответственно, в пределах 0,08–0,77 мкг/г в.о. и 0,023–2,63 мг/г в.о. с минимальными значениями для обоих газов в нижнем менее восстановленном слое с низким содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$. Концентрация метана в воде активных источников варьировалась от 26,3 до 38,4 мкл/л и была в среднем в 2 раза выше, чем в водах питаемого ими ручья и недействующего источника. Удельный поток метана с поверхности воды активных источников варьировался в диапазоне 0,6–1,5 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$, что на 2 порядка ниже удельного потока CO_2 , составляющего 46,4–106,1 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$. Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) CH_4 и CO_2 , измеренный в поднимающихся со дна газовых пузырьках одного из восходящих источников, указывает на современный биохимический генезис данных парниковых газов.

Ключевые слова: рассолы, донные отложения, катион-анионный состав, Eh, pH, $\text{C}_{\text{орг}}$, метан, диоксид углерода, сероводород, концентрация, распределение, эмиссия, изотопный состав

Для цитирования: Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Ковалев Е.А., Талпа Б.В., Андреев Ю.А., Тамбиева Н.С., Краснова Е.А. Подземные источники балки Пещерная озера Баскунчак: гидрохимические особенности и эмиссия парниковых газов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 63–75.

Благодарности: исследование выполнено по гранту Российского научного фонда № 23-27-00330, <https://rscf.ru/project/23-27-00330/>, в Южном федеральном университете.

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

© Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Ковалев Е.А., Талпа Б.В., Андреев Ю.А., Тамбиева Н.С., Краснова Е.А., 2024

Original article

UNDERGROUND SOURCES OF THE PESHCHERNAYA BEAM OF LAKE BASKUNCHAK: HYDROCHEMICAL FEATURES AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS

D.N. Garkusha^{1✉}, Yu.A. Fedorov², E.A. Kovalev³, B.V. Talpa⁴, Yu.A. Andreev⁵,
N.S. Tambieva⁶, E.A. Krasnova⁷

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

^{5, 6} Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁷ V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAN, Moscow, Russia

¹ gardim1@yandex.ru✉

² fedorov@sfedu.ru

³ evkova@sfedu.ru

⁴ talpabv@gmail.com

⁵ y.andreev@gidrohim.mecom.ru

⁷ e.krasnova@oilmsu.ru

Abstract. For the first time, full-scale measurements of methane and carbon dioxide emissions by the chamber method were carried out in summer for groundwater sources discharged in the valley of the Peshchernaya Gulch creek, located in the north-west of Lake Baskunchak. pH values, concentrations of CH₄, basic ions, gross Fe and Mn were determined in the water of the sources; concentrations of CH₄, H₂S, organic matter, Eh and pH values, density and humidity were determined in various layers of bottom sediments (up to 27 cm). A detailed description of the identified groundwater sources was carried out, their primary morphometric and morphological characteristics were measured, as well as the flow rate. It was found that more than 10 ascending karst sources of groundwater are discharged in the Peshchernaya beam, 5 of which were active during the research period and mainly confined to the left screw of the beam. The active sources of the left screw of the beam are characterized by a small flow rate and are sodium chloride brines with a mineralization of 93.9–107.1 g/l. The bottom sediments accumulating in the sinkholes of underground sources are characterized by a neutral acid-base environment and restorative conditions. The concentrations of CH₄ and ΣH₂S in the sediments of the sources varied, respectively, in the range of 0.08–0.77 μg/g vl.o. and 0.023–2.63 mg/g vl.o. with minimal values for both gases in the lower less reduced layer with a low content of S_{org}. The concentration of methane in the water of active sources varied from 26.3 up to 38.4 μl/l and was on average 2 times higher than in the waters of a stream fed by them and an inactive source. The specific methane flux from the water surface of active sources varied in the range of 0.6–1.5 mg/(m²·h), which is 2 orders of magnitude lower than the specific CO₂ flux of 46.4–106.1 mg/(m²·h). The isotopic composition of carbon (δ¹³C) CH₄ and CO₂ measured in gas bubbles rising from the bottom of one of the ascending sources indicates the modern biochemical genesis of these greenhouse gases.

Keywords: brines, bottom sediments, cation-anionic composition, Eh, pH, S_{org}, methane, carbon dioxide, hydrogen sulfide, concentration, distribution, emission, isotopic composition

For citation: Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Kovalev E.A., Talpa B.V., Andreev Yu.A., Tambieva N.S., Krasnova E.A. Underground Sources of the Peshchernaya Beam of Lake Baskunchak: Hydrochemical Features and Greenhouse Gas Emissions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(1):63-75. (In Russ.).

Acknowledgments: the study was carried out under the grant of the Russian Science Foundation No. 23-27-00330, <https://rscf.ru/project/23-27-00330/>, 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

Баскунчак – это крупное, бессточное, самосадочное, соленое озеро, расположенное на Прикаспийской низменности, примерно в 270 км к северу от Каспийского моря и в 53 км к востоку от р. Волга. Площадь озера составляет около 96 км², длина береговой линии – 42 км. Озеро вытянуто с северо-запада на юго-восток на 16,5 км, максимальная ширина – до 9 км. Урез воды (рапы) в озере находится на 21 м ниже уровня Каспийского моря.

Озеро Баскунчак возникло в западной части Прикаспийской низменности в результате солянокупольной тектоники – как компенсационная впадина (мульда), расположенная между соляными куполами и имеющая мощность озерных отложений четвертичного возраста свыше 270 м [1]. Соляные купола данного района имеют сходное строение и представлены толщей галита (по геофизическим данным их мощность превышает 800 м), перекрытой в кровле гипсовыми отложениями мощностью от 10 до 80 м. Глубина залегания «гипсовой шляпы» меняется от 0 до 50 м [1].

Соленость оз. Баскунчак в среднем составляет около 300 г/л, что связано как с поступлением в озеро высокоминерализованных вод ручьев, так и с аридным климатом, обуславливающим высокую испаряемость воды [2]. Особенно крупные ручьи формируются на северо-западном и северном побережье озера за счет мощных восходящих источников. Эти источники, как правило, несут высокоминерализованные воды, которые насыщаются солью при циркуляции в зоне соляных штоков, а также обогащаются сульфатами при восхождении к дневной поверхности по перекрывающим соляные купола сильнозакарстованным гипсоносным отложениям пермского возраста [3, 4]. В отдельных работах (например, [5, 6]) отмечается, что во многих этих источниках, наряду с разгрузкой вод, наблюдается выделение струй газов различной интенсивности.

На настоящий момент восходящие источники (родники), питающие притоки оз. Баскунчак, плохо изучены. В научной литературе сведения о местоположении данных источников, их количестве, дебите, морфометрических и морфологических характеристиках, химическом и газовом составе вод, гранулометрическом и минералогическом составе накапливающихся в них донных отложений, компонентном составе выделяющихся в атмосферу из источников газов, их концентрациях и потоках отсутствуют либо единичны. Так, единичные измерения удельного потока метана в атмосферу с поверхности воды активно дегазирующего источника в нижнем течении ручья Улан-Благ показали [5] достаточно большие его значения – в среднем около 2 мг/(м²·ч). Воды исследованных восходящих подземных источников также содержали высокие концентрации метана (до 215 мкл/л), которые на 1–2 порядка превышали его концентрации в рапе оз. Баскунчак.

Слабая изученность относится и к источникам, питающим достаточно крупный ручей балки Пещерная, расположенной на северо-западе оз. Баскунчак. Расход воды в ручье составляет около 3 % от общего стока Северной группы ручьев [4]. Согласно единичным сведениям [3, 7], по химическому составу воды карстовых источников, питающих ручей балки Пещерная, представляют собой хлоридно-натриевые рассолы с минерализацией около 85 г/л. По происхождению это рассолы выщелачивания, образовавшиеся в результате взаимодействия инфильтрационных вод с галитом соляных штоков и гипсоносных отложений пермского возраста при участии процессов молекулярной диффузии [7].

Целью настоящего исследования является изучение химического и газового состава вод и донных отложений, а также потоков метана (СН₄) и диоксида углерода (СО₂) в восходящих источниках подземных вод, разгружающихся в балке Пещерная.

Материалы и методы исследования

В конце июня 2023 г. в балке Пещерная проведены рекогносцировочные работы с целью нахождения подземных источников, питающих ручей, и их картирования. Помимо рекогносцировки, авторами проведен отбор проб воды и донных отложений из подземных источников, а также в ручье, питаемом ими (рис. 1). В воде определены значения рН, температуры, концентрации СН₄, основных ионов, валовых Fe и Mn; в различных горизонтах донных отложений – концентрации СН₄, сероводорода (ΣН₂S), органического вещества (С_{орг}), значения Eh и рН, плотность и влажность. Выполнено подробное описание выявленных источников подземных вод, измерены их первичные морфометрические и морфологические характеристики и дебит, с помощью 2-метрового щупа определена мощность накопленных отложений. В источниках подземных вод № 2 и 11 проведены натурные измерения удельных потоков СН₄ и СО₂ в атмосферу. Кроме этого, в источнике № 2 (т. 2) для определения изотопного значения углерода СН₄ и СО₂ в бутылку объемом 0,5 л отобраны пробы поднимающихся со дна пузырьков газа методом вытеснения с использованием пересыщенного раствора NaCl в качестве буфера.

Донные отложения отобраны с помощью полипропиленовой трубки длиной 500 мм и диаметром 45 мм с остро заточенными краями и поршнем для выдавливания керна. При отборе проб трубку с максимальным усилием вдавливали в отложения до упора.

Отбор проб воды и донных отложений и последующее определение CH_4 и $\sum\text{H}_2\text{S}$ в них проведены согласно аттестованным методикам [8–10]. Измерение значений pH, Eh и температуры выполнено с помощью иономера «Экотест 2000» сразу после отбора проб. Концентрации основных ионов определены по общепринятым в системе Росгидромета стандартным методикам [11], валовые содержания Fe и Mn – по [12]. Определение концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ в отложениях выполнено по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-2021). Одновременно с отбором проб отложений в заранее взвешенные и пронумерованные бюксы отбирали навеску отложений для определения их плотности и влажности и последующего пересчета концентраций CH_4 и $\sum\text{H}_2\text{S}$ на влажный и сухой вес осадка.

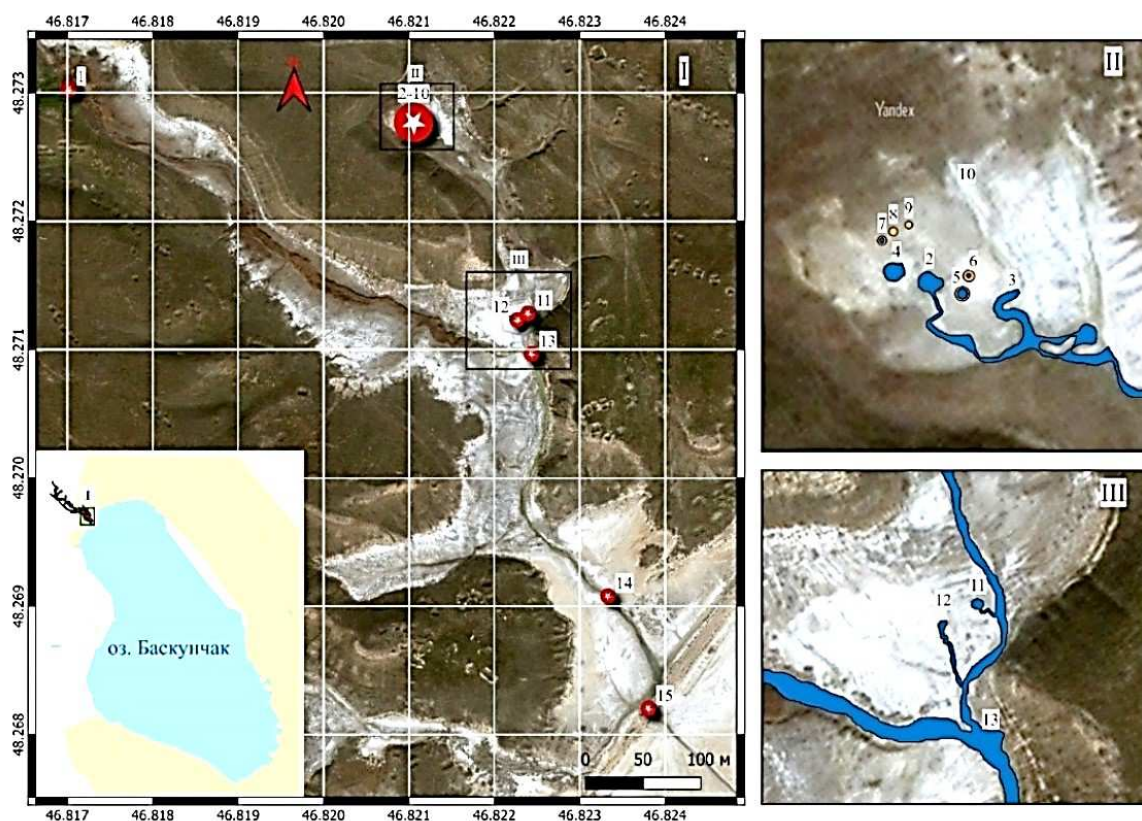


Рис. 1. Местоположение точек наблюдения в балке Пещерная в июне 2023 г.
/ Fig. 1. Location of observation points in the Peshchernaya beam in June 2023

Удельный поток CH_4 и CO_2 рассчитан по скорости изменения их концентрации в воздушной фазе камер с учетом «холостых» проб, отбираемых сразу после установки ловушек (экспозиция 0 мин).

Для определения концентраций CO_2 в воздушной фазе камер использован переносной газоанализатор инфракрасный ПГА-1 с калибровочной камерой, силиконовым шлангом и грушей для принудительного забора газовой фазы. Диапазон измерений объемной доли CO_2 составляет от 0 до 2 об. %.

Отбор проб газовой смеси воздушной фазы камер проведен согласно методическим приемам, описанным в работах [5, 13–16].

Определение метана в отобранных пробах воды, донных отложений и воздушной фазы выполнено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе по методикам [9, 10].

Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) CH_4 и CO_2 измерялся на масс-спектрометре изотопных отношений Delta V Advantage (Finnigan, Бремен, Германия) с пробоподготовкой на линии GC Isolink, включающей газовый хроматограф Trace GC Ultra и приставку Isolink с окислительным реактором по методике, описанной в работе [17, 18]. Данные по изотопному составу углерода представлены относительно стандарта PDB [19].

Результаты исследования и их обсуждение

Балка Пещерная протягивается с северо-запада на юго-восток примерно на 3,3 км. Авторами была исследована нижняя километровая часть балки, где ее долина резко расширяется (от 4–10 до 100 м), а глубина вреза увеличивается до 6–8 м (рис. 1, врезка I). По направлению к устью ширина балки несколько возрастает, достигая в устьевой части 120–130 м. По тальвегу нижней широкой части балки в зарослях тростника протекает небольшой ручей шириной до 2–3 м, берущий начало от подземного источника, расположенного в 0,8 км выше устья. Балка в нижней части имеет два крупных ответвления (левый и правый отвершки). Левый отвершек, ответвляющийся от балки на расстоянии 360 м от устья, имеет длину 300 м и ширину до 90 м в верхней его части. По его дну также протекает небольшой ручей шириной до 0,3 м. Расход ручья в устье левого отвершка составляет 0,001 м³/с. Правый отвершек длиной до 150 м и шириной до 50 м ответвляется от балки в 200 м от устья и в период наблюдения имел сухую ложбину стока. В устьевой части ручья балки Пещерная сток воды в озеро купируется дамбой (до 2–2,5 м высотой) с заделанной в ее теле трубой диаметром 0,5 м (т. 15), через которую сбрасываются воды ручья. В период исследования водопропускное отверстие не обеспечивало беспрепятственного стока воды, вследствие чего перед дамбой образовался разлив воды до 120 м в длину и до 10 м в ширину. Расход воды в ручье в 90 м выше дамбы (т. 14) составлял 0,005 м³/с, что близко к значениям, приведенным в работе [4].

В верхней части балки Пещерная, в 0,8 км выше устья, имеется каптированный действующий источник № 1 – колодец с сильно разрушенным деревянным каптажем, обустроенный в прошлом столетии для питья животных. Вода прозрачная, ее вкус сладковатый, без запаха. Температура воды в период исследования составляла 16,4 °С, рН 7,39, минерализация – 4,0 г/л, концентрация СН₄ – 26,3 мкл/л, концентрация валового железа и марганца – 1,0 и 0,64 мг/л соответственно (табл. 1). В воде развиваются нитчатые водоросли и личинки комаров. Сток избытка воды из колодца в балку осуществляется через сливное отверстие в верхней его части, давая начало ручью, который практически на всем протяжении от истока до соединения с ручьем левого отвершка (около 500 м) протекает в зарослях тростника шириной до 10–20 м.

В верхней части днища левого отвершка балки Пещерная расположено дебитное поле (рис. 1, врезка II) размером 60×50 м, пересекаемое с севера на юг тремя хорошо проявленными ложбинами стока, дающими начало ручью в данном ответвлении балки. В период наблюдения только в 2 из 3 ложбин стока поступала вода от 2 действующих источников.

Источник № 2 приурочен к наполненной зеленоватой водой (рапой) кратерообразной карстовой воронке с размером чаши 4,9×3,1×0,7 м (длина, ширина, глубина) и столбом воды до 0,7 м (рис. 2). Минерализация рапы в данном источнике составляла 107,1 г/л (рассолы), температура 25,6 °С, рН 6,87, концентрация валового железа и марганца – 1,10 и 0,64 мг/л соответственно. По химическому составу воды источника № 2 в соответствии с классификацией [20] относятся к классу хлоридных вод, группе натриевых вод, третьему типу. Для его вод формула Курлова, в которой перечисляются ионы по содержанию их в % экв. от большего к меньшему (из расчета к 50 % сумм анионов и катионов отдельно), имеет следующий вид:

$$M_{107,1} = \frac{(\text{Cl})_{47,17}(\text{SO}_4)_{2,73}(\text{HCO}_3)_{0,10}}{(\text{Na} + \text{K})_{47,02}(\text{Ca})_{2,65}(\text{Mg})_{0,33}} \text{pH}(6,87)\text{T}(25,6).$$

Мощность рыхлых отложений, измеренная специальным 2-метровым шупом в карстовой воронке источника № 2, достигала 1,1 м. В данном источнике основные физико-химические показатели исследованного слоя донных отложений (до 24 см) следующие (табл. 2): влажность – 36,2–61,1 %; плотность – 1,35–1,70 г/см³; рН 7,01–7,09 (нейтральная среда); Eh –167,7...–70,0 мВ (восстановительная обстановка); концентрации С_{орг} – 1,90–2,70 мг/г сухого осадка (с.о.). Концентрации СН₄ и ∑Н₂S в донных отложениях, представленных влажными глинистыми илами с заметным вкладом песчано-алевритового материала, варьировались в пределах 0,12–0,77 мкг/г влажного осадка (вл.о.) (в среднем 0,46 мкг/г) и 0,043–0,172 мг/г вл.о. (в среднем 0,125 мг/г) соответственно. Максимальные содержания обоих газов приурочены к промежуточным горизонтам (2–5 и 5–10 см) отложений, минимальные – к нижнему наиболее плотному (20–24 см) слою с наименьшим содержанием С_{орг}.

Таблица 1 / Table 1

Результаты определения физико-химических показателей воды подземных источников и ручья балки Пещерная и удельных потоков CH₄ и CO₂ в атмосферу / Results of determination of physical and chemical parameters of water of underground sources and the stream of the Peshchernaya beam and specific fluxes of CH₄ and CO₂ into the atmosphere

Номер и местоположение точки отбора проб	Координаты, с.ш./в.д.	Температура, °C / рН	Минерализация, мг/л / концентрация CH ₄ , мкл/л	Fe _{вал} , мг/л / Mn _{вал} , мг/л	Скорость потока, мг CH ₄ /(м ² ·ч) / мг CO ₂ /(м ² ·ч)
1. Каптированный действующий источник № 1 (колодец с сильно разрушенным деревянным каптажем)	48°16'23.74" / 46°49'01.12"	<u>16,4</u> 7,39	<u>4,0</u> 26,3	<u>1,00</u> 0,64	– *
2. Действующий источник № 2 в карстовой воронке, расположенной в дебитном поле в верхней части днища левого отвершка балки Пещерная	48°16'21.90" / 46°49'15.70"	<u>25,6</u> 6,87	<u>107,1</u> 29,8	<u>1,10</u> 0,64	<u>0,60–0,75 (2)</u> 106,13
4. Недействующий источник воды № 4 в карстовой воронке, расположенной в дебитном поле в верхней части днища левого отвершка балки Пещерная	48°16'21.93" / 46°49'15.38"	<u>26,1</u> –	<u>–</u> 12,5	–	–
11. Действующий источник № 11 в карстовой воронке, в 25 м выше слияния ручьев в балке Пещерная	48°16'16.18" / 46°49'20.52"	<u>15,3</u> 6,89	<u>93,9</u> 32,5–38,4 (2)	<u>0,80</u> 0,06	<u>1,17–1,52 (2)</u> 46,37
12. Действующий источник № 12 в карстовой воронке, в 8 м ниже источника № 11 в балке Пещерная	48°16'16.37" / 46°49'20.52"	–	<u>–</u> 35,7	–	–
13. Ручей в балке Пещерная, в зоне слияния ручьев основной балки и левого отвершка	48°16'15.52" / 46°49'20.65"	<u>21,0</u> 7,27	<u>59,4</u> 13,6	<u>1,26</u> 0,12	–

Примечание. * – в скобках приведено количество измерений; прочерк – измерения не проводились.

Таблица 2 / Table 2

Результаты определения физико-химических показателей донных отложений подземных источников и ручья балки Пещерная / Results of determination of physical and chemical parameters of bottom sediments of underground sources and the stream of the Peshchernaya beam

№ точки отбора проб	Горизонт, см	CH ₄ , мкг/г вл.о. / с.о.	ΣH ₂ S, мг/г вл.о. / с.о.	рН / Eh, мВ	Плотность, г/мл / влажность, %	Сорг., мг/г с.о.	Визуальное описание донных отложений
2	0–2	<u>0,18</u> 0,46	<u>0,136</u> 0,350	<u>7,01</u> –167,7	<u>1,354</u> 61,1	2,70	Темно-коричневый, влажный глинистый ил с заметным вкладом песчано-алеритового материала
	2–5	<u>0,77</u> 1,80	<u>0,150</u> 0,346	<u>7,04</u> –123,4	<u>1,479</u> 56,7	2,53	
	5–10	<u>0,77</u> 1,70	<u>0,172</u> 0,373	<u>7,09</u> –77,3	<u>1,417</u> 53,9	2,50	
	20–24	<u>0,12</u> 0,18	<u>0,043</u> 0,067	<u>7,07</u> –70,0	<u>1,703</u> 36,2	1,90	
11	0–2	<u>0,45</u> 0,99	<u>2,63</u> 5,80	<u>6,71</u> –154,8	<u>1,359</u> 54,7	2,62	Темно-серый, влажный глинистый ил с заметным вкладом песчано-алеритового материала. Книзу сильно уплотняется. Запах H ₂ S в верхнем слое 0–5 см
	2–5	<u>0,46</u> 1,01	<u>1,81</u> 4,04	<u>6,72</u> –150,5	<u>1,402</u> 55,2	2,70	
	5–10	<u>0,08</u> 0,14	<u>0,356</u> 0,657	<u>6,68</u> –124,1	<u>1,416</u> 45,8	2,27	
	23–24	<u>0,11</u> 0,14	<u>0,023</u> 0,029	<u>7,08</u> –50,9	<u>2,189</u> 21,6	0,84	

Окончание табл. 2

№ точки отбора проб	Горизонт, см	CH ₄ , мкг/г вл.о. / с.о.	ΣH ₂ S, мг/г вл.о. / с.о.	pH / Eh, мВ	Плотность, г/мл / влажность, %	Сорг., мг/г с.о.	Визуальное описание донных отложений
13	0–2	<u>0,46</u> 0,72	<u>3,74</u> 5,82	<u>6,90</u> –184,4	<u>1,385</u> 35,7	2,58	Сверху (2–3 мм) светло-коричневая бактериальная пленка, под которой черный (до 15 см) глинисто-алевритовый ил с примесью песчаной фракции. Запах H ₂ S
	2–5	<u>1,80</u> 2,55	<u>4,10</u> 5,80	<u>7,12</u> –347,6	<u>1,411</u> 29,3	2,47	
	5–10	<u>1,19</u> 1,64	<u>2,70</u> 3,73	<u>7,27</u> –350,0	<u>1,620</u> 27,6	2,26	Темно-серый, мягкий, глинисто-алевритовый ил с незначительной примесью песка
	22–27	<u>0,39</u> 0,52	<u>0,22</u> 0,29	<u>6,90</u> –177,3	<u>1,597</u> 24,6	1,89	

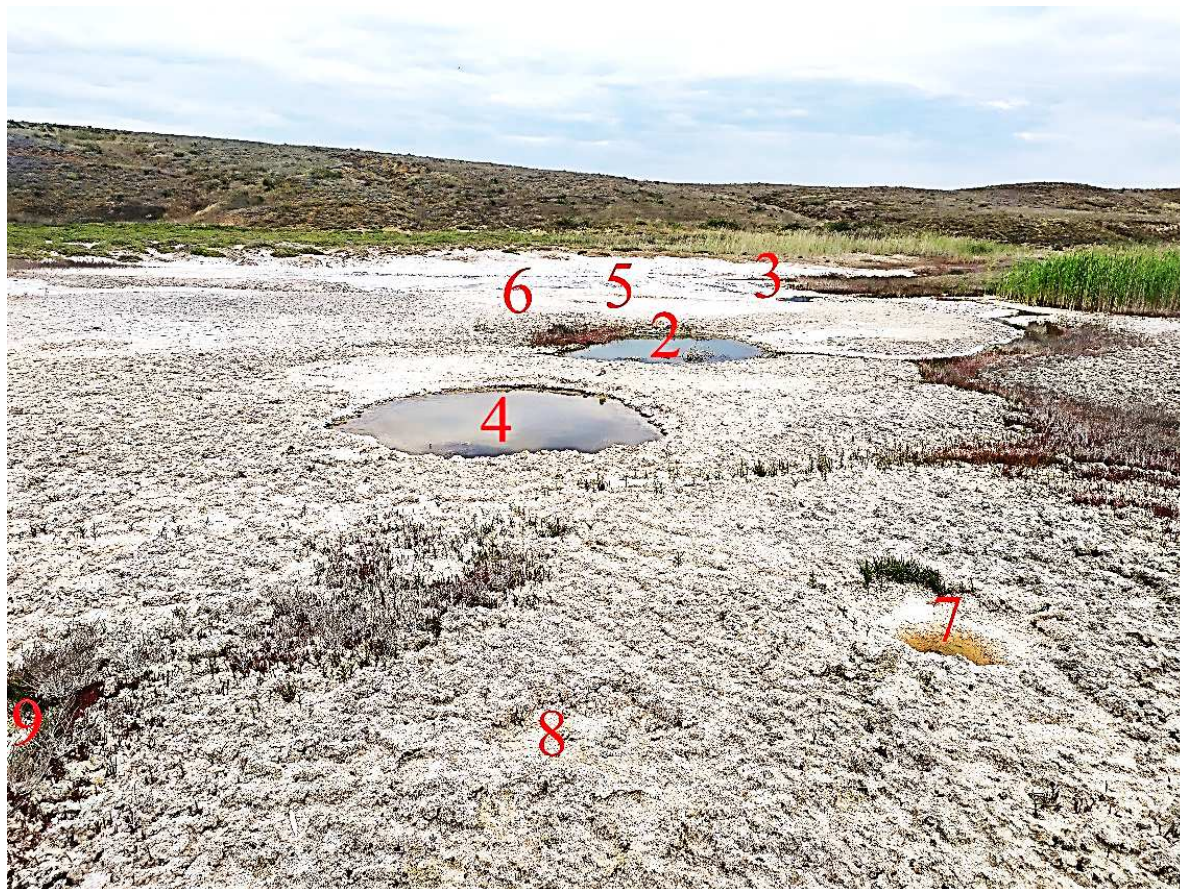


Рис. 2. Действующие и неактивные подземные источники верхней части дна левого отвершка балки Пещерная, июнь 2023 г. / Fig. 2. Active and inactive underground sources of the upper part of the bottom of the left hole of the Peshchernaya beam, June 2023

Концентрация CH₄ в рапе источника № 2 в период исследования составляла 29,8 мкл/л. При этом значения удельных потоков CH₄ и CO₂ с поверхности воды этого источника, по данным натурных измерений, составили 0,60–0,75 мг CH₄/(м²·ч) и 106,13 мг CO₂/(м²·ч) соответственно. Изотопный состав углерода (δ¹³C) CH₄ и CO₂ в газовых пузырьках, поднимавшихся со дна карстовой воронки данного источника, характеризуется изотопным отношением –88,10 ‰ для CH₄ и –14,10 ‰ для CO₂, что указывает на их современный биохимический генезис [19].

Из карстовой воронки источника № 2 по водоэрозионной рытвине рапа с дебитом 1 л/мин переливается в 2 м южнее расположенную ложбину стока, протягивающуюся ближе к правому борту левого отвершка балки. В период наблюдений выше впадения вод данного источника ложбина стока была хорошо проявлена, однако была сухой и более заросшей растительностью.

В 10 м восточнее источника № 2 наблюдается примерно такой же по дебиту источник № 3, просачивающийся из-под солевой корки в центральной ложбине стока (рис. 2). Третья ложбина стока, протягивающаяся ближе к левому борту отвершка, в период наблюдений была сухой.

В радиусе до 10 м от действующего источника № 2 выделяется еще 6 источников в карстовых воронках (блюдцах, лунках) различного размера (от 0,5 до 4 м), из которых на момент проведения исследований разгрузка вод уже не происходила. В воронках уровень воды был различным: от практически предельной наполненности до полной сухости. При этом наличие воды в чашах большинства недействующих источников свидетельствует об относительно недавнем прекращении разгрузки вод из них.

В 3 м севернее от действующего источника № 2 в кратерообразной, почти до краев наполненной рассолом карстовой воронке с размером чаши $3,6 \times 3,3 \times 0,7$ м и столбом воды до 0,65 м расположен близкий по площади и форме недействующий источник № 4, концентрация CH_4 в воде которого была в 2,4 раза ниже (12,5 мкл/л), чем в действующем источнике № 2; температура составляла 26,1 °С. Мощность рыхлых отложений в карстовой воронке источника № 4 достигала 1,3 м. В обеих кратерных воронках источников № 2 и 4 северный бортик чаши более пологий, а в их воде активно развиваются галофильные организмы – жаброногие рачки *Artemia salina* и мухи-береговушки. Асимметрия карстовых воронок объясняется [21] влиянием таяния снега и уклонов дна балки.

В 3 м юго-восточнее и 3–4 м восточнее от действующего источника № 2 в карстовых воронках изометричной формы расположены еще два недействующих источника – № 5 и 6 с размерами чаш $1,23 \times 1,20 \times 0,30$ и $1,12 \times 0,9 \times 0,27$ м и уровнем воды 14 и 2 см соответственно. Еще 3 источника (№ 7–9) расположены в небольших лунках округлой и овальной формы по северному периметру недействующего источника № 4 в 4 м от него и в 1–3 м друг от друга. При этом в лунке № 7 (размером $0,9 \times 0,8 \times 0,17$ м), расположенной западнее всех источников, было немного воды (3 см), в средней лунке № 8 (размером $0,46 \times 0,66 \times 0,12$ м) воды уже не было, однако влажность ее дна и хорошо видимое выводное отверстие свидетельствуют о недавнем ее испарении. Лунка № 9 (размером $0,8 \times 0,5 \times 0,1$ м), расположенная севернее и гипсометрически выше всех источников, имела признаки давно недействующего источника, поросшего по периметру галофильной растительностью.

В 15 м северо-восточнее от действующего источника № 2, в наиболее верхней, северной части дна балки, вблизи тростниковых зарослей шириной до 20 м, оконтуривающих подошву склона, расположена крупная блюдцеобразная воронка диаметром до 6–7 м и глубиной до 0,1–0,2 м (источник № 10). Она имеет ярко выраженную ложбину стока, выстланную розовато-коричневой солевой коркой, сложенной почковидными агрегатами. Отсутствие воды в данном блюдце и сильновыветренный характер солей на ее дне позволяет предположить, что как в год наблюдений, так и в предшествующие несколько лет разгрузка вод из данного источника не происходила.

Вся поверхность дебитного поля левого отвершка балки Пещерная выстлана солевой коркой 2–3 см (белого, серого, желто-серого и коричнево-серого цветов), которая вокруг действующих и недействующих источников и их потоков сложена почковидными агрегатами диаметром до 1–2 см. Внутри почковидной солевой корки местами наблюдается тонкая ярко-зеленая прослойка, предположительно образованная простейшими галофильными водорослями.

В 180 м ниже описанного дебитного поля (II) в зоне соединения левого отвершка с основной балкой имеется еще одно дебитное поле (III), состоящее из двух действующих в период наблюдения малодебитных источников – № 11 и 12, расположенных на расстоянии 8 м друг от друга и в 15–23 м выше слияния ручьев левого отвершка и основной балки (рис. 3). Данные источники разгружаются в небольших чашеобразных карстовых воронках с коническим углублением посередине. При хождении вблизи источников фиксируется выделение пузырьков газа, при поднесении горячей спички к которым воспламенения не происходит. На поверхности рассола обоих источников наблюдается хорошо выраженная пленка желто-коричневого цвета, происхождение которой может быть обусловлено окислением кислородом воздуха Fe(II) подземных вод до Fe(III) .

Размеры чаши большей воронки (источник № 11) составляют $0,74 \times 0,72 \times 0,5$ м, столб воды – до 0,5 м. В данном источнике размеры поля изливания вод, представленного 2–3-сантиметровой коркой выпаренной соли, сложенной желтовато-коричневыми почковидными агрегатами, достигли $8,4 \times 7,8$ м. Минерализация рапы в источнике № 11 в период исследования составляла 93,9 г/л

(рассолы), температура 15,3 °С, рН 6,89, концентрация валового железа и марганца – 0,80 и 0,06 мг/л соответственно. По химическому составу воды данного источника близки к водам источника № 2, расположенного гипсометрически выше, и по классификации [20] относятся к классу хлоридных вод, группе натриевых вод, второму типу. Формула Курлова для вод источника № 11 имеет следующий вид:

$$M_{93,9} = \frac{(Cl)_{46,72}(SO_4)_{3,17}(HCO_3)_{0,10}}{(Na+K)_{46,83}(Ca)_{2,89}(Mg)_{0,29}} pH(6,89)T(15,3).$$



Рис. 3. Действующие подземные источники и точки наблюдения в зоне соединения левого отвершка с основной балкой, июнь 2023 г. / Fig. 3. Operating underground sources and observation points in the area of connection of the left screw with the main beam, June 2023

В целом полученные результаты по минерализации и химическому составу исследованных источников в левом отвершке балки Пещерная согласуются с данными [3, 7].

Мощность рыхлых отложений в карстовой воронке источника № 11 не превышала 0,6 м. В данном источнике основные физико-химические показатели исследованного слоя донных отложений (до 24 см) следующие (табл. 2): влажность – 21,6–55,2 %; плотность – 1,36–2,19 г/см³; рН 6,68–7,08 (нейтральная среда); Eh –154,8...–50,9 мВ (восстановительная обстановка); концентрации $C_{орг}$ – 0,84–2,70 мг/г с.о. Концентрации CH_4 и $\sum H_2S$ в донных отложениях, представленных, как и в источнике № 2, уплотняющимися книзу глинистыми илами со значительной долей песчано-алевритового материала, находились в пределах 0,08–0,45 мкг/г вл.о. (в среднем 0,28 мкг/г) и 0,023–2,63 мг/г вл.о. (в среднем 1,21 мг/г) соответственно. То есть в отложениях данного источника было в среднем в 1,6 раза меньше CH_4 и в 9,6 раза больше $\sum H_2S$ по сравнению с источником № 2. Максимальные концентрации обоих газов приурочены к верхним (0–2 и 2–5 см) наиболее восстановленным горизонтам отложений, содержащим повышенное количество $C_{орг}$, минимальные – к нижним более плотным слоям с наименьшим содержанием $C_{орг}$.

Концентрация метана в 2 пробах рапы, отобранных в источнике № 11, составляла 32,5–38,4 мкл/л. Удельные потоки CH_4 и CO_2 с поверхности данного источника варьировались в пределах 1,17–1,52 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и 46,37 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ соответственно.

Расположенный в 8 м ниже источник № 12 разгружается в карстовой воронке с размером чаши 0,52×0,52×0,5 м и столбом воды до 0,5 м. Размеры поля излияния вод из данного источника составляют 3,3×3,0 м, мощность рыхлых отложений в карстовой воронке достигает 1,2 м. Концентрация метана в воде этого источника (35,7 мкл/л) входит в диапазон варьирования его концентраций в воде источника № 11, что может свидетельствовать об общем генезисе их вод.

В ручье балки Пещерная, в 2 м ниже зоны слияния вод ручьев левого отвершка и основной балки, минерализация воды в период исследования составляла 59,4 г/л (рассолы), температура 21,1 °С, рН 7,27, концентрация валового железа и марганца – 1,26 и 0,12 мг/л соответственно. Концентрация CH_4 в воде ручья балки Пещерная составляла 13,6 мкл/л, что близко к его концентрации, измеренной в водах неактивного источника № 4, и заметно ниже, чем в водах исследованных действующих источников. По химическому составу воды ручья, так же как и источника № 11, по классификации [20] относятся к классу хлоридных вод, группе натриевых вод, второму типу. Меньшая минерализация вод ручья, по сравнению с исследованными подземными источниками в левом отвершке, обусловлена разгрузкой менее соленых источников в долине ручья основной балки, в частности источника № 1, минерализация вод которого в период наблюдений была 4,0 г/л. Формула Курлова для вод ручья балки Пещерная ниже зоны слияния вод ручьев левого отвершка и основной балки имеет следующий вид:

$$M_{59,3} = \frac{(\text{Cl})_{45,94}(\text{SO}_4)_{3,87}(\text{HCO}_3)_{0,19}}{(\text{Na}+\text{K})_{45,99}(\text{Ca})_{3,58}(\text{Mg})_{0,43}} \text{pH}(7,27)\text{T}(21,0).$$

В ручье балки Пещерная основные физико-химические показатели исследованного слоя донных отложений (до 27 см) следующие (табл. 2): несколько меньшая, чем в источниках, влажность – 24,6–35,7 %; сопоставимые плотность – 1,39–1,62 г/мл, рН 6,90–7,27 и концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ – 1,89–2,58 мг/г с.о.; однако существенно более отрицательные значения Eh – 350,0...–177,3 мВ (резко восстановительная обстановка). Концентрации CH_4 и $\sum \text{H}_2\text{S}$ в донных отложениях, представленных черными и темно-серыми глинисто-алевритовыми илами с примесью песка, находились в пределах 0,39–1,80 мкг/г вл.о. (в среднем 0,86 мкг/г) и 0,22–4,10 мг/г вл.о. (в среднем 2,69 мг/г) соответственно и были заметно выше, чем в исследованных источниках. При этом так же, как и в источниках, минимальные концентрации обоих газов фиксируются в нижнем (25–27 см) более плотном и менее восстановленном горизонте отложений с наименьшим содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$.

Заключение

В балке Пещерная разгружаются более 10 восходящих карстовых источников подземных вод, из которых в период исследований были активны 5. В основной балке выявлен один достаточно крупный действующий источник с солоноватой водой (минерализация 4 г/л), дающий начало ручью балки Пещерная. Остальные источники приурочены к левому ответвлению балки и характеризуются относительно небольшим дебитом, по химическому составу представляют собой хлоридно-натриевые рассолы с минерализацией 93,9–107,1 г/л. Валовые концентрации железа и марганца в исследованных источниках варьировались в пределах 0,80–1,10 и 0,06–0,64 мг/л соответственно. Концентрация метана в воде активных источников изменялась в диапазоне 26,3–38,4 мкл/л (среднее значение 32,5 мкл/л) и была в 2 раза выше по сравнению с водами питаемого ими ручья балки Пещерная и недействующего источника.

Мощность рыхлых отложений, накопившихся в карстовых воронках исследованных подземных источников, достигает 1,3 м. Изученные горизонты донных отложений (до 24 см) представлены глинистыми илами со значительной долей песчано-алевритовой фракции, для которых характерны нейтральная кислотно-щелочная среда (рН от 6,68 до 7,09) и восстановительная обстановка (Eh от –167,7 до –50,9 мВ). Концентрации CH_4 и $\sum \text{H}_2\text{S}$ в отложениях источников изменяются, соответственно, в пределах 0,08–0,77 мкг/г вл.о. и 0,023–2,63 мг/г вл.о. Концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ варьируются от 0,84 до 2,70 мг/г с.о., заметно снижаясь в нижних менее восстановленных слоях отложений.

Донные отложения ручья балки Пещерная характеризуются сопоставимыми с отложениями подземных источников значениями pH и концентрациями $C_{орг}$, меньшей влажностью и резко восстановительными значениями Eh (–177,3...–350,0 мВ), которые и обуславливают, вероятно, более высокие, чем в исследованных источниках, концентрации CH_4 и $\sum H_2S$ (0,39–1,80 мкг/г вл.о. и 0,22–4,10 мг/г вл.о. соответственно). При этом в отложениях как ручья, так и источников минимальные концентрации обоих газов фиксируются в нижнем более плотном и менее восстановленном слое отложений с наименьшим содержанием $C_{орг}$.

Удельный поток метана с поверхности воды активных источников варьировался в диапазоне 0,60–1,52 мг $CH_4/(m^2 \cdot ч)$ и на 2 порядка был ниже удельного потока CO_2 , составляющего 46,4–106,1 мг $CO_2/(m^2 \cdot ч)$. Просматривается тенденция снижения потока CH_4 с увеличением потока CO_2 . Изотопный состав углерода ($\delta^{13}C$) CH_4 и CO_2 , измеренный в поднимающихся со дна газовых пузырьках одного из восходящих источников, указывает на современный биохимический генезис данных парниковых газов.

Список источников

1. Куриленко В.В., Зеленковский П.С. Месторождение минеральных солей оз. Баскунчак: геология, особенности современного соленакопления, механизмы природо- и недропользования // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Серия 7: Геология. География. 2008. № 3. С. 17–32.
2. Литовский В.В. Гравиогеография соленых озер Урала и сопредельных территорий. III: Особенности геохимии и генезиса // Геогр. вестн. 2018. № 4 (47). С. 11–20.
3. Кучерук Т.А., Амельченко В.Н. Подземные трещинно-карстовые воды кунгурского яруса // Геология, география и глобальная энергия. 2008. № 4 (31). С. 73–75.
4. Зеленковский П.С., Куриленко В.В. Природно-техногенная система соляного озера Баскунчак и особенности эксплуатации её ресурсов // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Серия 7: Геология. География. 2013. № 4. С. 33–52.
5. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Талпа Б.В., Ковалев Е.А. Концентрация и эмиссия метана и сероводорода в озере Баскунчак, ручье балки Улан-Благ и дегазирующих источниках подземных вод в весенний период // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 79–91.
6. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Talpa B.V., Trubnik R.G., Kovalev E.A. The first data on methane concentrations in degassing griffins of Lake Baskunchak // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 407. Article 02012. P. 1–8.
7. Мязина Н.Г. Генезис и геохимия карстовых вод района озера Баскунчак // Южн.-Рос. вестн. геологии, географии и глобальной энергии. 2006. № 4 (17). С. 170–172.
8. РД 52.24.525-2011. Массовая доля сульфидной серы в донных отложениях. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2011. 26 с.
9. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2012. 23 с.
10. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2013. 19 с.
11. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. Л. В. Боевой. Ростов н/Д.: НОК, 2009. Ч. 1. 1037 с.
12. РД 52.24.377-2021. Массовая концентрация алюминия, бериллия, ванадия, железа, кадмия, кобальта, марганца, меди, молибдена, никеля, свинца, серебра, хрома и цинка в водах. Методика выполнения измерений атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией проб. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2021. 38 с.
13. Фёдоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Шипкова Г.В. Эмиссия метана торфяными залежами верховых болот Псковской области // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 88–97.
14. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 48–58.
15. Gar'kusha D.N., Sukhorukov V.V. Methane Emissions by Reed Formations on the Azov Sea Coast // OnLine J. of Biological Sciences. 2019. Vol. 19, № 4. P. 286–295.
16. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Мельников Е.В. Эмиссия метана рисовыми полями Ростовской области // Почвоведение. 2023. № 8. С. 889–902.

17. Краснова Е.А., Юрченко А.Ю., Калмыков А.Г., Фомина М.М. Изотопно-геохимические особенности распределения газообразных углеводородов в разрезе баженовской свиты (южная часть Западной Сибири) // Георесурсы. 2019. Т. 21, № 2. С. 153–158.
18. Rice A.L., Gotoh A.A., Ajie H.O., Tyler S.C. High-precision continuous-flow measurement of $\delta^{13}\text{C}$ and δD of atmospheric CH_4 // Analytical Chemistry. 2001. Vol. 73, № 17. P. 4104–4110.
19. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: Истина, 1999. 370 с.
20. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 444 с.
21. Головачев И.В. Рельеф // Состояние и многолетние изменения природной среды на территории Богдинско-Баскунчакского заповедника / под ред. И.Н. Сафроновой, П.И. Бухарицина, А.В. Бармина. Волгоград: Царицын, 2012. С. 59–60.

References

1. Kurilenko V.V., Zelenkovsky P.S. Mineral salt deposit of Lake Baskunchak: geology, features of modern salt accumulation, mechanisms of natural and subsurface use. *Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta. Seriya 7: Geologiya. Geografiya = Bulletin of the St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography.* 2008;(3):17-32. (In Russ.).
2. Litovsky V.V. Graviogeography of the salt lakes of the Urals and adjacent territories. III: Features of geochemistry and genesis. *Geogr. vestn. = Geographical Bulletin.* 2018;(4):11-20. (In Russ.).
3. Kucheruk T.A., Amelchenko V.N. Underground fractured karst waters of the Kungursky tier. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, Geography and Global Energy.* 2008;(4):73-75. (In Russ.).
4. Zelenkovsky P.S., Kurilenko V.V. The natural-technogenic system of the Baskunchak salt lake and the peculiarities of exploitation of its resources. *Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta. Seriya 7: Geologiya. Geografiya = Bulletin of the St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography.* 2013;(4):33-52. (In Russ.).
5. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Trubnik R.G., Talpa B.V., Kovalev E.A. Concentration and emission of methane and hydrogen sulfide in Baskunchak Lake, Ulan-Blag Beam creek and degassing groundwater sources in spring. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(3):79-91. (In Russ.).
6. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Talpa B.V., Trubnik R.G., Kovalev E.A. The first data on methane concentrations in degassing griffins of Lake Baskunchak. *E3S Web of Conferences.* 2023;407(02012):1-8.
7. Myazina N.G. Genesis and geochemistry of karst waters of the Baskunchak Lake area. *Yuzhn.-Ros. vestn. geologii, geografii i global'noi energii = South-Russian Bulletin of Geology, Geography and Global Energy.* 2006;(4):170-172. (In Russ.).
8. RD 52.24.525-2011. *The mass fraction of sulfide sulfur in bottom sediments. The method of performing measurements by photometric method with N,N-dimethyl-p-phenylenediamine.* Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2011. 26 p. (In Russ.).
9. RD 52.24.512-2012. *The volume concentration of methane in the waters. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis.* Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2012. 23 p. (In Russ.).
10. RD 52.24.511-2013. *The mass fraction of methane in bottom sediments. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis.* Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2013. 19 p. (In Russ.).
11. Boeva L.V., ed. *Guidelines for the chemical analysis of land surface waters.* Rostov-on-Don: NOK Publ.; 2009. Ch. 1. 1037 p. (In Russ.).
12. RD 52.24.377-2021. *The mass concentration of aluminum, beryllium, vanadium, iron, cadmium, cobalt, manganese, copper, molybdenum, nickel, lead, silver, chromium and zinc in the waters. The method of performing measurements by atomic absorption method with electrothermal atomization of samples.* Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2021. 38 p. (In Russ.).
13. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Shipkova G.V. Methane emission from peat deposits of the upper marshes of the Pskov region. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources.* 2015;(1):88-97. (In Russ.).
14. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Calculation of methane balance elements in aquatic ecosystems of the Sea of Azov and the World Ocean based on empirical formulas. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 2016;(6):48-58. (In Russ.).
15. Gar'kusha D.N., Sukhorukov V.V. Methane Emissions by Reed Formations on the Azov Sea Coast. *Online Journal of Biological Sciences.* 2019;19(4):286-295.
16. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Melnikov E.V. Methane emission by rice fields of the Rostov region. *Pochvovedenie = Soil Science.* 2023;(8):889-902. (In Russ.).

17. Krasnova E.A., Yurchenko A.Yu., Kalmykov A.G., Fomina M.M. Isotope-geochemical features of the distribution of gaseous hydrocarbons in the section of the Bazhenov formation (southern part of Western Siberia). *Georesursy = Geo Resources*. 2019;21(2):153-158. (In Russ.).

18. Rice A.L., Gotoh A.A., Ajie H.O., Tyler S.C. High-precision continuous-flow measurement of $\delta^{13}\text{C}$ and δD of atmospheric CH_4 . *Analytical Chemistry*. 2001;73(17):4104-4110.

19. Fedorov Yu.A. *Stable isotopes and the evolution of the hydrosphere*. Moscow: Istina Publ.; 1999. 370 p. (In Russ.).

20. Alekin O.A. *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1970. 444 p. (In Russ.).

21. Golovachev I.V. Relief. *The state and long-term changes of the natural environment on the territory of the Bogdinsk-Baskunchak Reserve*. Ed. by I. N. Safronova, P. I. Bukharitsin, A. V. Barmin. Volgograd: Tsaritsyn Publ.; 2012:59-60. (In Russ.).

Информация об авторах

Дмитрий Николаевич Гарькуша – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Юрий Александрович Федоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Евгений Анатольевич Ковалев – аспирант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Борис Васильевич Талпа – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Юрий Александрович Андреев – кандидат химических наук, заведующий лабораторией методов и технических средств анализа вод.

Наталья Сергеевна Тамбиева – старший научный сотрудник, лаборатория методов и технических средств анализа вод.

Елизавета Андреевна Краснова – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, МГУ; старший научный сотрудник, лаборатория геохимии магматических и метаморфических пород, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского.

Information about the authors

Dmitry N. Garkusha - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Yury A. Fedorov - Doctor of Science (Geography), Professor, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Evgeny A. Kovalev - Postgraduate Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Boris V. Talpa - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Yuri A. Andreev - Candidate of Science (Chemistry), Head of the Laboratory of Methods and Technical Means of Water Analysis.

Natalia S. Tambieva - Senior Researcher, Laboratory of Methods and Technical Means of Water Analysis.

Elizaveta A. Krasnova - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Department of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals, MSU; Senior Researcher, Laboratory of Geochemistry of Igneous and Metamorphic Rocks, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry.

*Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена после рецензирования 14.12.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 28.11.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 19.02.2024.*

Научная статья

УДК 332.3; 551.588.7

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-76-88

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

**Белла Александровна Красноярова¹, Антон Евгеньевич Назаренко²,
Татьяна Геннадьевна Плуталова³, Софья Николаевна Шарабарина⁴**

^{1, 2, 3, 4} Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

¹ bella@iwep.ru

² harret1992@mail.ru

³ plutalova.tg@gmail.com

⁴ sharabarinasof@gmail.com

Аннотация. Изучение составляющих углеродного баланса и возможностей его регулирования при разных видах землепользования является актуальной научной задачей в рамках глобальной проблемы увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере и развития концепции углеродной нейтральности. В данной работе проведена оценка углеродного следа сельскохозяйственного предприятия на основе анализа возможностей углеродных калькуляторов Cool Farm Tool, AgRe-Calc, Farm Carbon и Ex-Act V9.4, а также Методики количественного определения объемов поглощения парниковых газов, утвержденной Приказом Минприроды РФ № 371 от 27.05.2022. Расчеты проводились на примере предприятия, расположенного в Бурлинском районе Алтайского края. Результаты исследования показали, что наибольший углеродный след образует выращивание льна, несколько меньший – посевы подсолнечника и пшеницы, наиболее низкий – кормовые культуры. Различия в оценках по разным методикам зафиксированы не только в полученных общих объемах углеродного следа, но и в структуре углеродного следа для каждой культуры.

В целом в России и за рубежом существуют различные подходы к определению углеродного следа. Подход, используемый в углеродных калькуляторах, предполагает, что весь так или иначе образованный в процессе хозяйственной деятельности углерод формирует углеродный след, тогда как методика Минприроды 2022 г. учитывает сельскохозяйственные угодья и в качестве важного поглотителя, резервуара углерода.

Ключевые слова: парниковые газы, углеродные калькуляторы, изменение климата, углеродный след, эмиссия углерода, сток углерода, сельскохозяйственное землепользование, Алтайский край

Для цитирования: Красноярова Б.А., Назаренко А.Е., Плуталова Т.Г., Шарабарина С.Н. Особенности оценки углеродного следа в сельском хозяйстве: сравнительный анализ методических подходов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 76–88.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00253 «Трансформация системы землепользования как инструмент регулирования углеродного баланса аграрного региона», <https://rscf.ru/project/23-27-00253/>, в Институте водных и экологических проблем СО РАН.

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

Original article

FEATURES OF ASSESSMENT THE CARBON FOOTPRINT IN AGRICULTURE: COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODOLOGICAL APPROACHES

Bella A. Krasnoyarova¹, Anton E. Nazarenko², Tatyana G. Plutalova³, Sofya N. Sharabarina⁴

^{1, 2, 3, 4} Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, RAS, Barnaul, Russia

¹ bella@iwep.ru

² harret1992@mail.ru

³ plutalova.tg@gmail.com

⁴ sharabarinasof@gmail.com

© Красноярова Б.А., Назаренко А.Е., Плуталова Т.Г., Шарабарина С.Н., 2024

Abstract. *The study of the components of the carbon balance and the possibilities of its regulation for different types of land use is an urgent scientific task within the framework of the global problem of increasing concentrations of greenhouse gases in the atmosphere and the development of the concept of carbon neutrality. In this article, an assessment of the carbon footprint of the farm was carried out based on an analysis of the capabilities of carbon calculators Cool Farm Tool, AgRe-Calc, Farm Carbon and Ex-Act V9.4, as well as the Methodology for quantitative determination of greenhouse gas absorption volumes, approved by Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 371 dated 05/27/2022. Calculations were carried out using the example of the farm located in the Burlinsky region of the Altai region. The results of the study showed that the largest carbon footprint of the considered farm is formed by the cultivation of flax, somewhat smaller by sunflower and wheat crops, and the lowest by fodder crops. Differences in estimates based on different methods are recorded not only in the resulting total carbon footprints, but also in the structure of the carbon footprint for each crop.*

In general, in Russia and abroad there are different approaches to determining the carbon footprint. The approach used in carbon calculators assumes that all carbon generated in one way or another during economic activity forms a carbon footprint, while the 2022 methodology of the Ministry of Natural Resources also takes agriculture into account as an important sink and carbon reservoir.

Keywords: *greenhouse gases, carbon calculators, climate change, carbon footprint, carbon emissions, carbon stock, agricultural land use, Altai region*

For citation: Krasnoyarova B.A., Nazarenko A.E., Plutalova T.G., Sharabarina S.N. Features of Assessment the Carbon Footprint in Agriculture: Comparative Analysis of Methodological Approaches. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):76-88. (In Russ.).

Acknowledgments: *the research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00253 “Transformation of the land use system as a tool for regulating the carbon balance of an agricultural region”, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00253/>, at the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.*

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

Введение

Изменение климата, обусловленное природными и антропогенными факторами, признано одним из самых серьезных вызовов, стоящих перед человечеством. Различные инициативы международного сообщества [1–6] определяют и демонстрируют основные направления научных исследований и практических действий по снижению концентраций парниковых газов в атмосфере Земли, а также по содействию адаптации к изменению климата. Однако лишь с 2000-х гг. началось детальное изучение влияния землепользования в глобальном масштабе на взаимодействие подстилающей поверхности и атмосферы Земли с позиций формирования потоков парниковых газов и энергии. Результаты этих исследований опубликованы в специальных докладах МГЭИК «Землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство» [5] и «Изменение климата и суша» [6].

Вклад землепользования (сельского хозяйства, лесного хозяйства и других видов землепользования – по определению МГЭИК) в глобальную эмиссию парниковых газов очень существен и составляет 23 %, в том числе около 13 % выбросов CO₂, 44 % метана (CH₄) и 81 % закиси азота (N₂O) за 2007–2016 гг. [6]. С другой стороны, землепользование является одновременно и мощным поглотителем CO₂: глобальные модели оценивают его углероддепонирующую способность в 11,2±2,6 ГтCO₂/год из атмосферы в течение 2007–2016 гг. Все это указывает на значимость всестороннего изучения составляющих углеродного баланса в разных типах экосистем и при разных видах землепользования.

В рамках данного научного направления в последние годы активно развивается концепция углеродного следа. Углеродный след (англ. carbon footprint) – совокупность всех выбросов парниковых газов, произведённых прямо и косвенно отдельным человеком либо организацией, предприятием или определенным продуктом. По ГОСТ ИСО 14067–2021 «Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению», углеродный след продукции – это сумма выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов в производственной системе, выраженная в единицах CO₂-эквивалента и основанная на оценке жизненного цикла продукции с использованием одной категории воздействия – изменение климата.

В российской научной литературе на сегодняшний день очень мало исследований, посвященных оценке углеродного следа в сельском хозяйстве. Можно отметить работы следующих авторов: О.Э. Суховеевой [7, 8], Д.В. Карелина и др. [9], А.С. Строкова [10], Н.Ю. Нестеренко [11]. Незаслуженно мало внимания уделяется изучению составляющих углеродного баланса в сельскохозяйственном землепользовании в противовес аналогичным работам в лесном секторе и промышленности.

Цель настоящего исследования – сравнительный анализ и апробация разных методических подходов при оценке углеродного следа модельного сельхозпредприятия; разработка рекомендаций по применению инструментов расчета углеродного следа растениеводства.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования проведена оценка углеродного следа растениеводческого предприятия, расположенного в Бурлинском районе Алтайского края. Край входит в топ-10 аграрно ориентированных регионов страны, отличается широким спектром агроклиматических условий, характеризуется самым большим пашенным полем в РФ.

Изучаемое предприятие расположено в степной зональной области, Кулундинской ландшафтной провинции (каштановые почвы); занимается возделыванием 5 видов сельскохозяйственных культур на общей площади 3400 га (рис. 1).

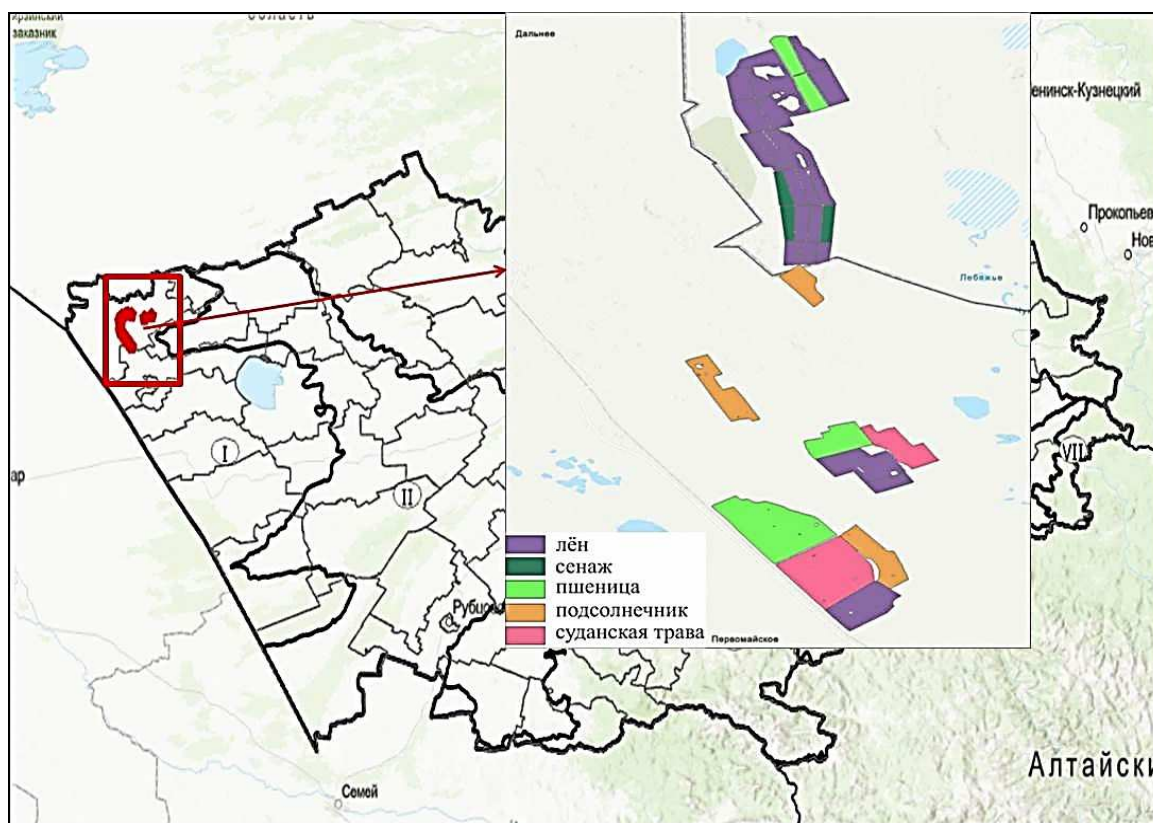


Рис. 1. Карта-схема посевных площадей предприятия (Ландшафтная карта Алтайского края. Масштаб 1:500000. ИВЭП СО РАН, 2016) / Fig. 1. Map of the farm's sown area (Landscape map of the Altai region. Scale 1:500000. IWEP SB RAS, 2016)

В качестве исходных данных для расчета углеродного следа выступают данные о посевных площадях сельскохозяйственных культур, урожайности, применяемых способах обращения с растительными остатками, удобрениях и средствах защиты посевов, а также данные о расходе топлива в процессе проведения сельскохозяйственных работ. Исходные данные получены в ходе выездного анкетирования руководства предприятия в июле 2023 г. (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Исходные данные (2022 г.) / Research database (2022)

Культура	S, га	Урожай, т	Обращение с растительными остатками	Годовой расход топлива (ДТ), л.	Удобрение, объем внесения	Средства защиты посевов (объем внесения)
Пшеница яровая	500	1 300	Измельчаются, запахиваются	18 000	НПК 16–16–16(6), 100 кг/га	«Торнадо-540» (1,5 кг/га), «Балерина Форте» (1л/га), «Борей Нео» (0,1 л/га)
Подсолнечник	1 200	1 320	Измельчаются, запахиваются	16 800	NP(S) 20:20(14), 70 кг/га	«Торнадо-540» (1,5 кг/га), «Балий» (0,6л/га), «Борей Нео» (0,1 л/га), «Мортира» (0,05 кг/га), «Квик-степ» (0,8л/га)
Сенаж	200	1 600	Скашиваются (продукция)	3 000	АМУ 40 %, 80 кг/га	«Борей Нео» (0,1 л/га), «Балерина Форте» (1л/га)
Лён	1 100	1 320	Измельчаются, запахиваются	39 600	АМУ 40 %, 70 кг/га	«Торнадо-540» (1,5 кг/га), «Борей Нео» (0,1 л/га), «Хакер» (0,1 кг/га), «Гербитокс» (0,6л/га), «Магнум» (0,004 кг/га), «Граммицид Миура» (1 л/га), «Ф Кредо» (0,5 л/га)
Суданская трава (суданское сорго)	400	1 400	Скашиваются (продукция)	3 200	АМУ 40 %, 70 кг/га	–

Оценка проведена с использованием четырех широко распространенных углеродных калькуляторов: Cool Farm Tool, AgRe-Calc, Farm Carbon и Ex-Act V9.4 (табл. 2), а также Методики количественного определения объемов поглощения парниковых газов, утвержденной Приказом Минприроды РФ № 371 от 27.05.2022 (далее – методика Минприроды). Углеродные калькуляторы – это специальные программы для расчета выбросов парниковых газов для фермеров, занимающихся растениеводством или животноводством. Все они основываются на Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. (с последними дополнениями и обновлениями) и работают преимущественно онлайн (необходима регистрация).

В общем виде структура углеродного следа растениеводства в рассматриваемых углеродных калькуляторах включает в себя сумму выбросов парниковых газов, вызванных образованием растительных остатков и обращением с ними, производством и внесением органических и минеральных удобрений, применением средств защиты посевов – гербицидов, фумигантов, инсектицидов, а также сжиганием топлива в процессе работы сельскохозяйственной техники.

Таблица 2 / Table 2

**Сравнительный анализ углеродных калькуляторов *
/ Comparative analysis of carbon calculators**

Характеристика	Ex-Act (the EX-Ante Carbon-balance Tool)	AgRE-Calc	Cool Farm Tool	Farm Carbon Calculator
Кем разработан	Отдел экономики агропродовольственного сектора ФАО при поддержке Всемирного банка и Agence Française de Développement	SAC Consulting и Scotland's Rural College (Великобритания)	Antithesis Group под руководством Sustainable Food Lab (компания Unilever) и Абердинский университет (Великобритания)	Компания Farm Carbon Toolkit (Великобритания)

Окончание табл. 2

Характеристика	Ex-Act (the EX-Ante Carbon-balance Tool)	AgRE-Calc	Cool Farm Tool	Farm Carbon Calculator
Как работает	На основе Microsoft Excel	Онлайн (создание учетной записи)	Онлайн (создание учетной записи)	Онлайн (создание учетной записи)
На чем основывается	Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. (с дополнениями 2019); дополнение 2013 г. для водно-болотных угодий, а также FAOSTAT, UNFCCC, ИНН, FEUD	Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. (методы уровня I и II МГЭИК); национальные данные из Национального кадастра парниковых газов Великобритании; для удобрений – исследование Fertilizers Europe (2018); для кормов – голландская база данных Feedprint и данные Глобального института оценки качества кормов (GFLI)	Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. (с дополнениями 2019) (методы уровня I и II МГЭИК)	Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. (с дополнениями 2019) (методы уровня I и II МГЭИК); Инвентаризация парниковых газов Великобритании и приложения к ней; для кормов для животных – база данных GFLI
Плюсы	Требует относительно небольшого объема данных; имеет дополнительные ресурсы (таблицы, карты), которые могут помочь найти необходимую информацию; использует модульный подход; производит расчет С-баланса с учетом реализации проекта и без него; наглядно показывает, какие компоненты с/х производства вносят наибольший вклад в углеродный след и, соответственно, как можно его уменьшить	Позволяет моделировать сценарии, чтобы понять влияние потенциальных изменений и отслеживать прогресс; порталы группового доступа позволяют легко сравнивать производительность различных систем, определяя практические и экологические действия по управлению для повышения производительности	Помогает фермерам оценить варианты управления фермерским хозяйством для улучшения показателей углеродного баланса с течением времени; охватывает практически все с/х культуры и животноводство во всем мире, за исключением культур, выращиваемых в непочвенных средах (например, в теплицах или на гидропонике)	Удобный интерфейс позволяет рассчитывать как выбросы, так и секвестрацию углерода по широкому спектру источников; графики помогают сделать результаты доступными и понятными
Минусы	Ограниченный выбор посевных культур; непрозрачный расчет: не указаны, какие уравнения и коэффициенты используются в каждом конкретном случае (нужно изучать дополнительные материалы и источники)	Непрозрачный расчет: не указаны, какие уравнения и коэффициенты используются в каждом конкретном случае; адаптирован для территории Европы (в частности, Великобритании)	Непрозрачный расчет: не указаны, какие уравнения и коэффициенты используются в каждом конкретном случае (нужно изучать дополнительные материалы)	Непрозрачный расчет: нужно дополнительно изучать указания по работе с данным калькулятором, чтобы понять методическую основу; адаптирован для территории Европы

* – составлено авторами на основе информации [12–15] и собственной работы на калькуляторах.

Методика Минприроды позволяет оценивать изменения запасов углерода в минеральных почвах: $\Delta C_{\text{минеральные}} = (C_{\text{fert}} + C_{\text{lime}} + C_{\text{plant}}) - (C_{\text{resp}} + C_{\text{erosion}})$, где $\Delta C_{\text{минеральные}}$ – изменения запасов углерода в пуле почвенного органического углерода в минеральных почвах, т С/год; C_{fert} – поступление углерода с органическими и минеральными удобрениями, т С /год; C_{lime} –

поступление углерода с известковыми материалами, т С /год; C_{plant} – поступление углерода с растительными остатками, т/год; C_{resp} – потери почвенного углерода с дыханием почв, т С /год; $C_{erosion}$ – механические потери почвенного углерода в результате эрозии и дефляции, т С /год.

Пересчет минерального углерода в парниковый углеродный эквивалент (CO₂) производится по формуле: $CO_2 = \Delta C \times (-\frac{44}{12})$.

В этой связи следует отметить, что в качестве выбросов (потерь) углерода и, соответственно, углеродного следа методика Минприроды определяет лишь сжигание топлива, дыхание почв и механические потери углерода. В то же время поступление углерода в почвы с растительными остатками и удобрениями методика рассматривает как источник пополнения углеродного пула почвы, который во многом влияет на её плодородие.

Для сравнения подходов к оценке расчет отдельных категорий углеродного баланса был проведен как на углеродных калькуляторах, так и по методике Минприроды.

Результаты и обсуждение

Сводные результаты оценки общего углеродного следа (т/год), образующегося в процессе выращивания сельскохозяйственных культур на предприятии, представлены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Сводные результаты оценки углеродного следа, т CO₂экв./год
 / Summary results of carbon footprint assessment, t CO₂eq./year

Категория	Cool Farm Tool	AgreCalc	FarmCarbon Calculator	Ex-Act	Методика Минприроды
Пшеница яровая					
Обращение с растительными остатками	47,5	107,112	33,98	40	33,27
Удобрения (производство, применение)	87,79	85,76	61,49	64	4,752
Защита посевов	5,14	1,13	15,83	13	н/д
Сжигание топлива	60,02	48,578	57,02	49	48,746
Итого	200,45	242,58	168,32	166,00	–
Подсолнечник					
Обращение с растительными остатками	141,98	н/д	н/д	н/д	49,69
Удобрения (производство, применение)	135,11	150,528	92,98	н/д	8,932
Защита посевов	12,9	3,577	39,65	н/д	н/д
Сжигание топлива	56,02	45,34	53,22	н/д	45,49
Итого	346,01	199,45	185,85	н/д	–
Сенаж					
Обращение с растительными остатками	0	0	50,46	н/д	37,29
Удобрения (производство, применение)	95,16	84,48	36,72	н/д	3,05
Защита посевов	0,70812	н/д	1,46	н/д	н/д
Сжигание топлива	9,75	8,16	9,5	н/д	8,12
Итого	105,61812	92,64	98,14	н/д	–

Окончание табл. 3

Категория	Cool Farm Tool	AgreCalc	FarmCarbon Calculator	Ex-Act	Методика Минприроды
Лён					
Обращение с растительными остатками	68,33	164,713	119,62	н/д	45,375
Удобрения (производство, применение)	156,88	132,07	176,73	н/д	14,68
Защита посевов	16,25	2,062	46,09	н/д	н/д
Сжигание топлива	132,04	106,872	125,44	н/д	107,24
Итого	373,50	405,72	467,88	н/д	–
Суданская трава					
Обращение с растительными остатками	0	н/д	0	0	28,083
Удобрения (производство, применение)	166,55	н/д	64,26	64	5,33
Защита посевов	0	н/д	0	0	н/д
Сжигание топлива	10,67	н/д	10,14	9	8,66
Итого	177,22	н/д	74,40	73,00	–

Наличие отметок «н/д» в некоторых ячейках таблицы связано с отсутствием возможности расчета отдельных показателей при использовании определенного калькулятора или методики. Так, в углеродном калькуляторе AgreCalc в списке сельскохозяйственных культур отсутствуют подсолнечник и суданская трава, что не позволяет оценить объем образующихся растительных остатков. Кроме того, оценка кормовых культур в данном калькуляторе представлена лишь в общем виде, без разбивки по культурам.

В калькуляторе Farm Carbon Calculator также отсутствует возможность расчета объема растительных остатков подсолнечника, хотя существует возможность оценки углеродного следа от сжигания топлива, внесения удобрений и защиты посевов. Это связано с тем, что расчет в данном калькуляторе производится с разбивкой не по отдельным культурам, а по категориям, составляющим углеродный след.

Калькулятор Ex-Act содержит ограниченный перечень культур, в списке отсутствуют подсолнечник, сенаж и лён.

Для проведения сравнительного анализа результаты суммарного углеродного следа по культурам (т CO₂экв./год), удельного углеродного следа по площади (кг CO₂экв. / га) и на 1 т урожая (кг CO₂экв./т продукции) по каждому калькулятору и методике были нормированы в диапазоне от 0 до 1 (*n*). Далее было рассчитано среднее арифметическое значение нормированных показателей и им присвоен ранг в диапазоне от 1 до 5, где 1 – культура с наибольшим углеродным следом, 5 – с наименьшим (табл. 4). Данные Ex-Act были исключены из расчета в связи с тем, что длина ряда – 2 значения – недостаточна для нормирования.

Если рассматривать общие результаты (т CO₂экв./год), полученные с использованием всех выбранных инструментов, наибольший углеродный след от растениеводства образует выращивание льна, несколько меньший – посевы подсолнечника и пшеницы, наиболее низкий – кормовые культуры: сенаж и суданская трава. Схожие результаты получены и для углеродного следа на единицу продукции (кг CO₂экв./т продукции). Следует отметить, что такие результаты обусловлены не только особенностями возделывания тех или иных сельскохозяйственных культур, но и их разной посевной площадью.

По причине разной продуктивности культур на 1 га площади, разных объемов растительных остатков, внесенных удобрений и разного расхода топлива удельный углеродный след распределяется иначе. В расчете на 1 га посевной площади среди оцениваемых культур наибольший углеродный след образует сенаж, на втором месте – пшеница, на третьем – лён, на четвертом – суданская трава. Наименьший углеродный след на 1 га – у подсолнечника.

Таблица 4 / Table 4

Сравнительный анализ углеродного следа сельскохозяйственных культур
/ Comparative analysis of the carbon footprint of agricultural crops

Культура	Cool Farm Tool		AgreCalc		FarmCarbon Calculator		Методика Минприроды		Среднее значение	Ранг
	CO ₂ экв.	<i>n</i>	CO ₂ экв.	<i>n</i>	CO ₂ экв.	<i>n</i>	CO ₂ экв.	<i>n</i>		
Суммарный углеродный след (т CO ₂ экв./год)										
Пшеница яровая	200,45	0,35	242,58	0,48	168,32	0,24	86,77	0,36	0,36	3
Подсолнечник	346,01	0,90	199,44	0,34	185,85	0,28	104,11	0,50	0,50	2
Сенаж	105,62	0,00	92,64	0,00	98,14	0,06	48,46	0,05	0,03	5
Лён	373,50	1,00	405,72	1,00	467,88	1,00	167,30	1,00	1,00	1
Суданская трава	177,22	0,27	н/д	н/д	74,40	0,00	42,07	0,00	0,09	4
Удельный углеродный след по площади (кг CO ₂ экв./га)										
Пшеница яровая	400,90	0,47	485,16	1,00	336,64	0,54	173,54	0,56	0,64	2
Подсолнечник	288,34	0,00	166,20	0,00	154,88	0,00	86,76	0,00	0,00	5
Сенаж	528,09	1,00	463,20	0,93	490,70	1,00	242,30	1,00	0,98	1
Лён	339,55	0,21	368,83	0,64	425,35	0,81	152,09	0,42	0,52	3
Суданская трава	443,05	0,65	н/д	н/д	186,00	0,09	105,18	0,12	0,29	4
Удельный углеродный след на единицу продукции (кг CO ₂ экв./т продукции)										
Пшеница яровая	154,19	0,41	186,60	0,52	129,48	0,25	66,74	0,38	0,39	3
Подсолнечник	262,13	0,90	151,09	0,37	140,80	0,29	78,87	0,50	0,52	2
Сенаж	66,01	0,00	57,90	0,00	61,34	0,03	30,29	0,00	0,01	5
Лён	282,95	1,00	307,36	1,00	354,45	1,00	126,74	1,00	1,00	1
Суданская трава	126,59	0,28	н/д	н/д	53,14	0,00	30,05	0,00	0,09	4

Следует отметить, что в связи с различиями в алгоритмах оценок углеродного следа результаты, полученные при расчете по углеродным калькуляторам Cool Farm Tool, AgRe-Calc, Farm Carbon и Ex-Act, а также по методике, утвержденной Минприроды, значительно разнятся. При этом различия зафиксированы не только в полученных общих объемах углеродного следа от выращивания различных сельскохозяйственных культур, но и в структуре углеродного следа для каждой культуры. Одни калькуляторы большую роль в углеродном следе отводят удобрениям, другие – влиянию растительных остатков. К схожим выводам в своем исследовании, касающемся углеродного следа животноводческих предприятий, также пришла О.Э. Суховеева [8].

Существует ряд причин полученных различий в результатах. Так, например, калькулятор Cool Farm Tool из всех примененных программных продуктов позволяет вводить для расчета наиболее широкий набор параметров и коэффициентов. Тем не менее для пересчета выбросов CH₄ и N₂O в эквивалент CO₂ калькулятор использует коэффициенты, равные 25 и 273 соответственно (методика Минприроды принимает данные коэффициенты равными 25 и 298, что говорит о разном понимании значимости парникового эффекта N₂O).

Калькулятор Ex-Act несколько схож с Cool Farm Tool, однако в большей степени ориентирован на оценку изменений в углеродном следе при планировании реализации какого-либо проекта в землепользовании, рассчитывая планируемый углеродный след при условии реализации проекта и при отказе от реализации. Кроме того, перечень культур в Ex-Act слишком ограничен, что позволяет сделать вывод о слабой пригодности данного инструмента для растениеводческих предприятий, имеющих широкий ассортимент выращиваемых культур.

Калькуляторы Agre-Calc и Farm Carbon, в отличие от остальных рассмотренных программных продуктов, не позволяют учитывать в расчете способ обращения с растительными остатками сельскохозяйственных культур. Agre-Calc также не учитывает объем и состав вносимых на поля средств защиты растений, а Farm Carbon не позволяет учесть климатические особенности территории и тип почвы в расчетах. Это упрощает проведение оценок для пользователей, однако ставит под сомнение их объективность.

Результаты, наиболее близкие к средним нормированным среди всех инструментов, показали расчеты по методике Минприроды.

Представим полученные результаты в удельных показателях по категориям, в расчете на 1 га посевной площади сельскохозяйственных культур и на 1 т произведенной продукции (рис. 2, 3).

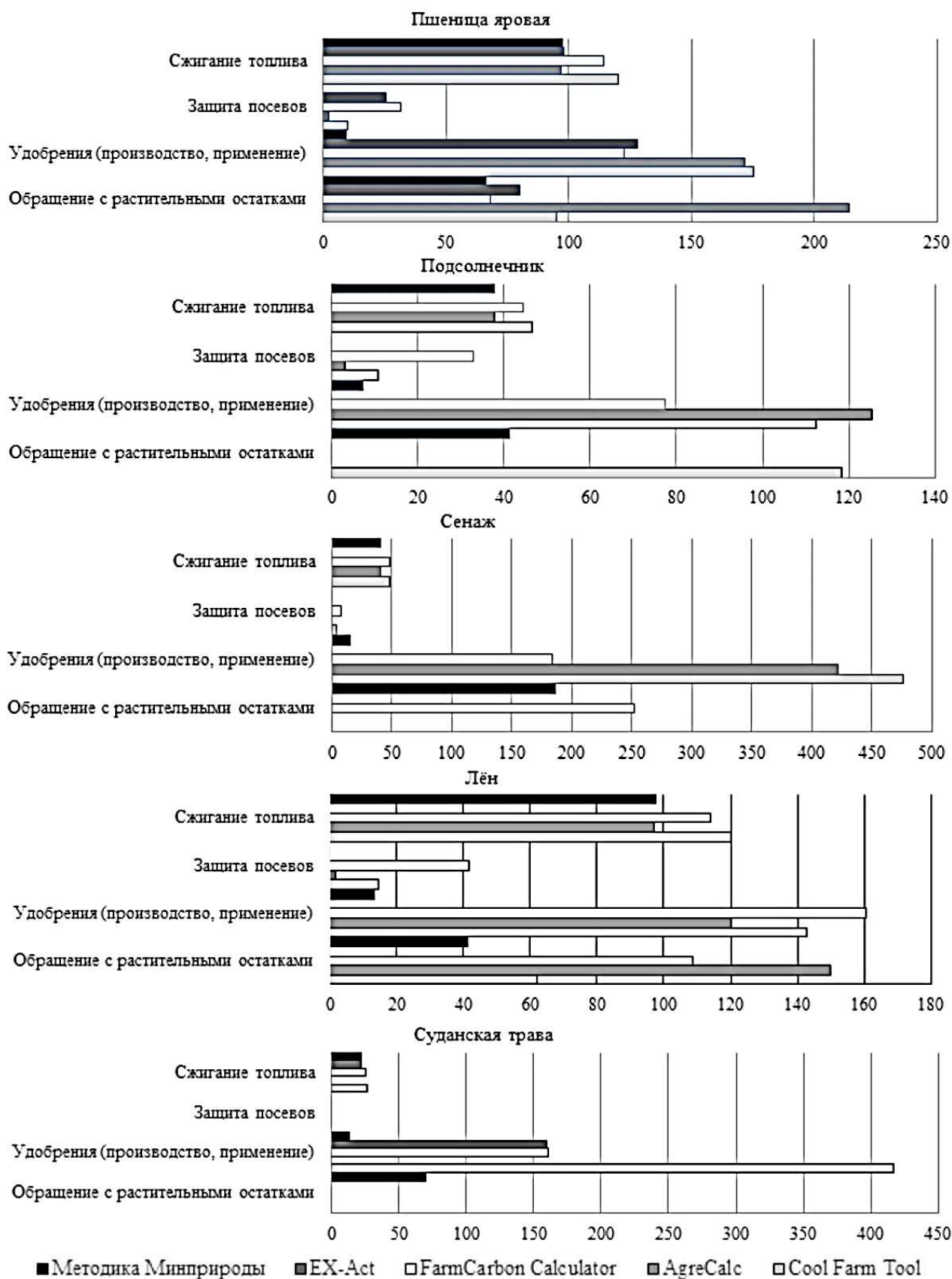


Рис. 2. Углеродный след от выращивания сельскохозяйственных культур, кг CO₂экв./га
 / Fig. 2. Carbon footprint from growing agricultural crops, kg CO₂eq./ha

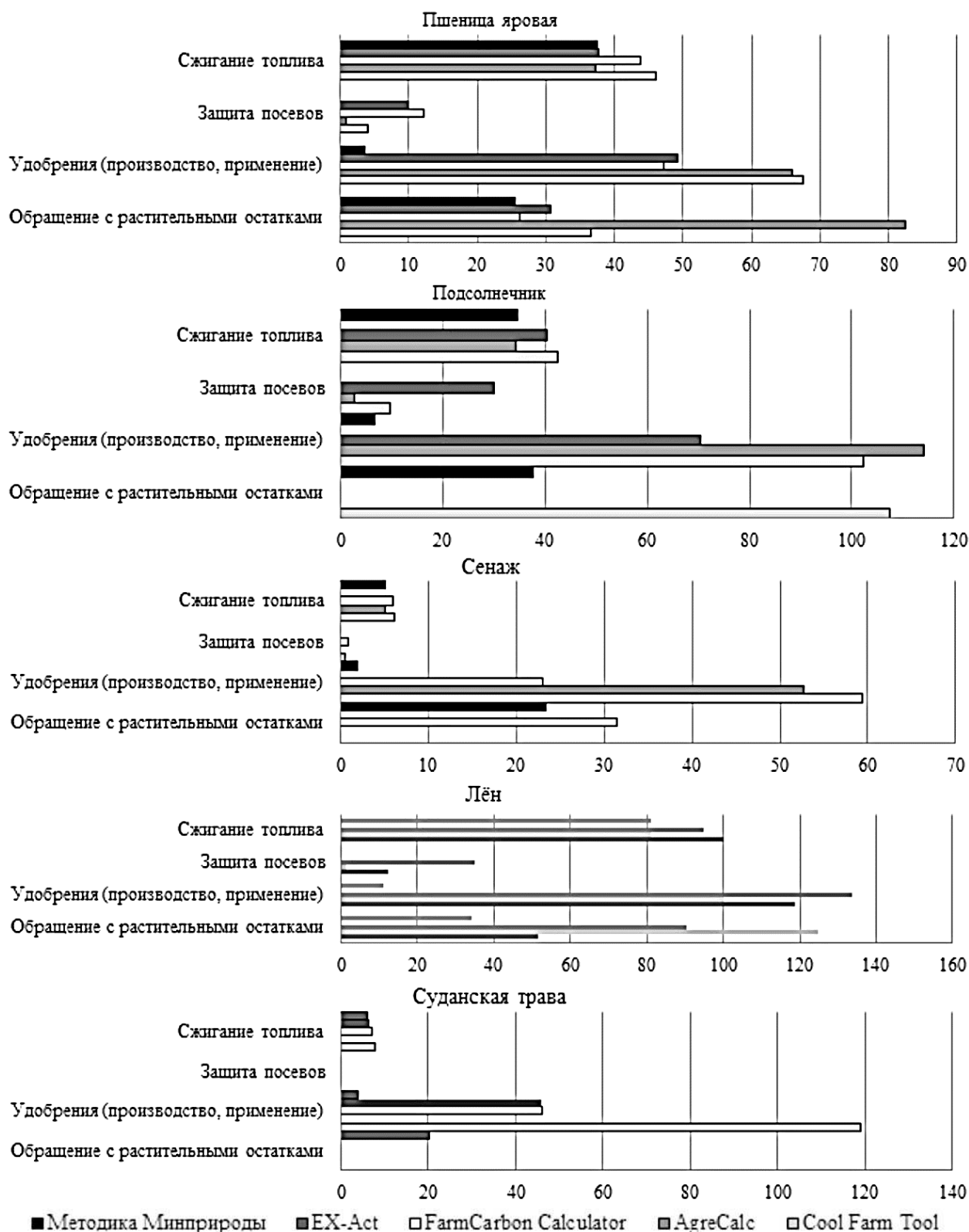


Рис. 3. Углеродный след от выращивания сельскохозяйственных культур, кг CO₂экв./т продукции / Fig. 3. Carbon footprint from growing agricultural crops, kg CO₂eq./t of product

Для посевов пшеницы и льна значимыми категориями формирования углеродного следа являются удобрения, обращение с растительными остатками и сжигание топлива. Для подсолнечника, сенажа и суданской травы наиболее значимую, определяющую роль в удельном углеродном следе играют удобрения.

Проанализируем результаты по основным категориям формирования углеродного следа. Углеродный эквивалент растительных остатков для кормовых культур калькуляторы Cool Farm Tool, Agre-Calc и Ex-Act принимают равным нулю, так как растительные остатки вывозятся с поля. Это позволяет сделать вывод о том, что данные калькуляторы учитывают в расчете лишь массу поверхностных растительных остатков. В то же время Farm Carbon и методика Минприроды учитывают как поверхностные, так и корневые растительные остатки и стерню, с которыми углерод поступает в почву (по данным калькуляторов получены схожие результаты для растительных остатков пшеницы).

По углеродному эквиваленту сжигания дизельного топлива методика Минприроды, Agre-Calc и Ex-Act показали практически одинаковый результат. Это предположительно связано с тем, что сжиганию топлива в контексте выбросов парниковых газов уделяется наиболее значимое внимание среди всех источников выбросов, и подходы к оценке в мировом сообществе уже достаточно отработаны. Отличия результатов Cool Farm Tool и Farm Carbon предположительно связаны с использованием в расчетах разных коэффициентов выбросов CO₂ при сжигании 1 т топлива.

Что касается углеродного эквивалента удобрений, калькуляторы учитывают как собственно объем внесенных удобрений, так и парниковые газы, выделенные в процессе их производства. Это приводит к тому, что результаты по массе парниковых газов превышают общую массу внесенных удобрений. Так, например, изучаемое предприятие в 2022 г. внесло на поля пшеницы 50 т удобрений, в то время как масса углеродного следа, по результатам расчета на углеродных калькуляторах, составила 61,49–87,79 т. Методика Минприроды для того, чтобы избежать двойного учета, в расчете углеродного эквивалента удобрений исходит из массы внесенных действующих веществ в продукте (удобрении) и содержании в действующих веществах углерода; на предприятиях-производителях удобрений их углеродный след учитывается отдельно.

Выводы

По результатам исследования выявлено, что в мировой практике применяются различные подходы к определению структуры углеродного следа растениеводства. Подход, применяемый углеродными калькуляторами, предполагает, что углеродный след включает в себя весь так или иначе привнесенный в процессе выращивания сельскохозяйственных культур углерод, в том числе если он в виде растительных остатков или удобрений внесен в почву. Методика Минприроды РФ в качестве углеродного следа, в свою очередь, определяет суммарные выбросы парниковых газов от сжигания топлива, дыхания почв и механических потерь углерода, а поступление углерода в почву с растительными остатками и удобрениями определяет как источники пополнения углеродного пула почвы.

Наибольший общий углеродный след рассмотренного предприятия образует выращивание льна, несколько меньший – посевы подсолнечника и пшеницы, наиболее низкий – кормовые культуры: сенаж и суданская трава. Данные результаты обусловлены не только особенностями возделывания тех или иных сельскохозяйственных культур, но и их разной посевной площадью. Удельный углеродный след сельскохозяйственных культур на 1 га посевной площади распределяется иначе по причине разной продуктивности культур, разных объемов растительных остатков, внесенных удобрений и разного расхода топлива: наибольший углеродный след образует сенаж, на втором месте – пшеница, на третьем – лён, на четвертом – суданская трава. Наименьший углеродный след на 1 га среди выращиваемых на предприятии культур – у подсолнечника.

В связи с различиями в алгоритмах оценок углеродного следа (различающийся набор вводимых параметров, разные значения применяемых для расчета коэффициентов и удельных значений выбросов, разный уровень обобщения и разная логика расчетов) результаты, полученные при расчете по углеродным калькуляторам Cool Farm Tool, AgRe-Calc, Farm Carbon и Ex-Act, а также по методике, утвержденной Минприроды, значительно отличаются. При этом различия зафиксированы не только в полученных общих объемах углеродного следа от выращивания различных сельскохозяйственных культур, но и в структуре углеродного следа для каждой культуры. Одни калькуляторы большую роль в углеродном следе относят удобрениям, другие – влиянию растительных остатков.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что в настоящее время в научном сообществе еще недостаточно разработаны инструменты и методы расчета углеродного следа растениеводства, а также не сложился единый подход к определению его структуры.

По результатам исследования выявлено, что для оценки отдельных элементов углеродного баланса и углеродного следа следует использовать рассмотренные инструменты в комплексе, комбинируя существующие подходы и мировой опыт. При этом результаты, наиболее близкие к средним нормированным среди всех инструментов, показали расчеты по методике Минприроды.

Список источников

1. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1997. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (дата обращения: 28.08.2023).
2. Парижское соглашение // Организация Объединенных Наций. 2015. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата обращения: 28.08.2023).
3. РКК ОООН // Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1992. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml (дата обращения: 28.08.2023).
4. IPCC 1992. *Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* / J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992. 200 p.
5. IPCC 2000. *Land Use, Land-use Change, and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 375 p.
6. IPCC 2019. *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. URL: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/> (дата обращения: 28.08.2023).
7. Суховеева О.Э. В помощь к использованию модели ROTHС в России: методика подготовки входной информации // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2020. Т. 31, № 3–4. С. 133–148. Doi: 10.21513/0207-2564-2020-3-133-148.
8. Суховеева О.Э. Углеродные калькуляторы как инструмент для оценки эмиссии парниковых газов от животноводства // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 497, № 1. С. 96–102. Doi: 10.31857/S2686739721030117.
9. Карелин Д.В., Суховеева О.Э., Золотухин А.Н., Лунин В.Н., Куст Г.С. Современные исследования и мониторинг углеродного баланса на Курской биосферной станции Института географии РАН в рамках концепции нейтрального баланса деградации земель // Вопросы географии. 2021. № 152. С. 253–280. Doi: 10.24057/probl.geogr.152.9.
10. Строчков А.С. Эмиссия парниковых газов при производстве растениеводческой продукции // Вестн. РАН. 2021. Т. 91, № 3. С. 265–272. Doi: 10.31857/S0869587321030099.
11. Нестеренко Н.Ю. Показатели оценки углеродного следа агропродовольственной системы // Экономика сельского хозяйства России. 2023. № 1. С. 11–23. Doi: 10.32651/231-11.
12. Углеродный калькулятор Farm Carbon. URL: <https://calculator.farmcarbontoolkit.org.uk> (дата обращения: 25.07.2023).
13. Углеродный калькулятор AgRe-Calc. URL: <https://www.agrecalc.com> (дата обращения: 26.07.2023).
14. Углеродный калькулятор Cool Farm Tool. URL: <https://coolfarm.org> (дата обращения: 27.07.2023).
15. Углеродный калькулятор Ex-Act. URL: [https://www.fao.org/climate-change/projects-and-programmes/project-detail/ex-ante-carbon-balance-tool-\(ex-act\)/en](https://www.fao.org/climate-change/projects-and-programmes/project-detail/ex-ante-carbon-balance-tool-(ex-act)/en) (дата обращения: 28.07.2023).

References

1. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. 1997. Available from: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml [Accessed 28th August 2023]. (In Russ.).
2. Paris Agreement. *United Nations*. 2015. Available from: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf [Accessed 28th August 2023]. (In Russ.).
3. UNFCCC. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. 1992. Available from: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml [Accessed 28th August 2023]. (In Russ.).
4. Houghton J.T., Callander B.A., Varney S.K., eds. *IPCC 1992. Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 1992. 200 p.

5. Watson R.T., Noble I.R., Bolin B. et al., eds. *IPCC 2000. Land Use, Land-use Change, and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2000. 375 p.

6. *IPCC 2019. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Available from: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/> [Accessed 28th August 2023].

7. Sukhoveeva O.E. To help use the ROTHM model in Russia: methods for preparing input information. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem = Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*. 2020;31(3-4):133-148, doi: 10.21513/0207-2564-2020-3-133-148. (In Russ.).

8. Sukhoveeva O.E. Carbon calculators as a tool for estimating greenhouse gas emissions from livestock farming. *Dokl. RAN. Nauki o Zemle = Doklady Earth Sciences*. 2021;497(1):96-102, doi: 10.31857/S2686739721030117. (In Russ.).

9. Karelin D.V., Sukhoveeva O.E., Zolotukhin A.N., Lunin V.N., Kust G.S. Modern research and monitoring of the carbon balance at the Kursk Biosphere Station of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences within the framework of the concept of a neutral balance of land degradation. *Voprosy geografii = Problems of Geography*. 2021;(152):253-280, doi: 10.24057/probl.geogr.152.9. (In Russ.).

10. Strokov A.S. Greenhouse gas emissions during crop production. *Vestn. RAH = Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2021;91(3):265-272, doi: 10.31857/S0869587321030099. (In Russ.).

11. Nesterenko N.Yu. Indicators for assessing the carbon footprint of the agricultural and food system. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii = Economics of Agriculture of Russia*. 2023;(1):11-23, doi: 10.32651/231-11. (In Russ.).

12. *Carbon calculator Farm Carbon*. Available from: <https://calculator.farmcarbontoolkit.org.uk> [Accessed 25th July 2023]. (In Russ.).

13. *Carbon calculator AgRe-Calc*. Available from: <https://www.agrecalc.com> [Accessed 26th July 2023]. (In Russ.).

14. *Carbon calculator Cool Farm Tool*. Available from: <https://coolfarm.org> [Accessed 27th July 2023]. (In Russ.).

15. *Carbon calculator Ex-Act*. Available from: [https://www.fao.org/climate-change/projects-and-programmes/project-detail/ex-ante-carbon-balance-tool-\(ex-act\)/en](https://www.fao.org/climate-change/projects-and-programmes/project-detail/ex-ante-carbon-balance-tool-(ex-act)/en) [Accessed 28th July 2023]. (In Russ.).

Информация об авторах

Б.А. Краснаярова – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования.

А.Е. Назаренко – кандидат географических наук, младший научный сотрудник лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования.

Т.Г. Плуталова – кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования.

С.Н. Шарабарина – кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования.

Information about the authors

B.A. Krasnoyarova - Doctor of Science (Geography), Professor, Main Researcher at the Laboratory of Landscape-Water-Ecological Research and Environmental Management.

A.E. Nazarenko - Candidate of Science (Geography), Junior Researcher at the Laboratory of Landscape-Water-Ecological Research and Environmental Management.

T.G. Plutalova - Candidate of Science (Geography), Researcher at the Laboratory of Landscape-Water-Ecological Research and Environmental Management.

S.N. Sharabarina - Candidate of Science (Geography), Researcher at the Laboratory of Landscape-Water-Ecological Research and Environmental Management.

*Статья поступила в редакцию 26.09.2023; одобрена после рецензирования 15.10.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 26.09.2023; approved after reviewing 15.10.2023; accepted for publication 19.02.2024.*

Научная статья

УДК 631.416.8

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-89-96

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА БУРОЗЕМОВ ОСТРОВА РЕЙНЕКЕ

Лариса Алексеевна Латышева

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

l.a.lat@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена роль природных и антропогенных факторов в формировании микроэлементного состава буроземов острова Рейнеке. Анализ коэффициентов концентрации содержания тяжелых металлов в островных буроземах показал, что в процессе почвообразования происходит активная аккумуляция в поверхностных горизонтах Zn, Cu, Cd и Co. Результаты исследований свидетельствуют о преобладающем влиянии особенностей почвообразования на содержание и распределение тяжелых металлов на участках, удаленных от побережья. По мере приближения к береговой зоне, любимой туристами, в поверхностном слое буроземов острова значительно повышается содержание Zn, Cu, Cd, что, вероятно, связано с локальным антропогенным воздействием. Данные профильного распределения тяжелых металлов в исследованных буроземах отражают интенсивность процессов гумусообразования, протекающих в профиле буроземов, и свидетельствуют о сродстве Pb, Cd и органических комплексов. Это подтверждается наличием значимых положительных коэффициентов корреляции между органическим веществом и содержанием Pb и Cd. Отмечена также роль физических показателей буроземов в закреплении в их профиле ряда тяжелых металлов. Количественные показатели содержания Cr и Ni в наибольшей степени обусловлены распределением илстой фракции. Высокие значения коэффициента корреляции между рН, суммой обменных оснований и содержанием Mn могут свидетельствовать о влиянии кислотно-основных свойств на его аккумуляцию в почвенном профиле. Немаловажная роль в закреплении Co в буроземах острова принадлежит гидроксидам марганца. Корреляционная связь Co с Mn оценивается как заметная.

Ключевые слова: тяжелые металлы, буроземы, остров Рейнеке, антропогенное влияние, коэффициент концентрации, корреляционный анализ

Для цитирования: Латышева Л.А. Влияние природных и антропогенных факторов на формирование микроэлементного состава буроземов острова Рейнеке // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 89–96.

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

Original article

THE INFLUENCE OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS ON THE FORMATION OF THE MICROELEMENT COMPOSITION OF BUROZEMS OF REINECKE ISLAND

Larisa A. Latysheva

Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

l.a.lat@mail.ru

© Латышева Л.А., 2024

Abstract. *The role of natural and anthropogenic factors in the formation of the microelement composition of the brown soils of the Reinecke Island is considered. Analysis of the concentration coefficients of heavy metals in the island brown soils showed that during soil formation, active accumulation occurs in the surface horizons of Zn, Cu, Cd and Co. The research results indicate the prevailing influence of soil formation features on the content and distribution of heavy metals in areas remote from the coast. As we approach the coastal zone, beloved by tourists for recreation, the content of Zn, Cu, Cd increases significantly in the surface layer of the island's brown soils, which is probably due to the local anthropogenic impact that takes place there. The data on the profile distribution of heavy metals in the studied brown soils reflect the intensity of the processes of humus formation occurring in the profile of brown soils and indicate the affinity of Pb, Cd to organic complexes. This is confirmed by the presence of significant positive correlation coefficients between organic matter and Pb and Cd content. The role of physical indicators of buruzems on the fixation of a number of heavy metals in their profile is also noted. Quantitative indicators of Cr and Ni content are most determined by the distribution of the silty fraction. High values of the correlation coefficient between pH, the sum of exchange bases and the Mn content may indicate the influence of acid-base properties on its accumulation in the soil profile. Manganese hydroxide plays an important role in fixing Co in the brown soils of the island. The correlation between Co and Mn is estimated as noticeable.*

Keywords: *heavy metals, buruzems, Reinecke Island, anthropogenic influence, concentration coefficient, correlation analysis*

For citation: Latysheva L.A. The Influence of Natural and Anthropogenic Factors on the Formation of the Microelement Composition of Buruzems of Reinecke Island. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):89-96. (In Russ.).

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

Введение

Островные территории Приморья всегда привлекают к себе внимание туристов как места отдыха с уникальными природными условиями, великолепными пляжами и хорошей рыбалкой. Однако активное посещение островов в летний период всегда сопряжено со значительным антропогенным воздействием на все составляющие компоненты их природных ландшафтов, прежде всего на почвенно-растительный покров. В этой связи получение информации о содержании различных форм тяжелых металлов в фоновых почвах является основой для проведения локального мониторинга и представляется крайне важным для исследования. Почвы острова Рейнеке не изучены в этом отношении. В рамках проводимых многолетних исследований на островах залива Петра Великого нами были установлены основные закономерности почвообразования и гумусонакопления в буроземах острова. Изучение микроэлементного состава этих буроземов позволит оценить их экологическое состояние и установить допустимые пределы нагрузки на территорию острова, расширить представления о природе протекающих в их профиле процессов.

Целью настоящей работы является выявление роли природных и антропогенных факторов, влияющих на аккумуляцию и миграцию тяжелых металлов в буроземах острова Рейнеке.

Объекты и методы исследования

Остров Рейнеке площадью 457 га входит в состав архипелага Императрицы Евгении. Рельеф низкогорный с максимальной отметкой 149 м. До начала 1970-х гг. остров испытывал сильное антропогенное воздействие. На его территории действовал рыбокомбинат и разводили крупный рогатый скот. Следствием активного хозяйственного освоения острова явилось значительное сокращение площадей его лесов (до 11 %) и замена их на вторичные кустарниковые разнотравно-злаковые растительные сообщества и послелесные луга. Луговая растительность представлена преимущественно осоково-злаково-разнотравными сообществами, на значительной части острова с рудбекией двуцветной. Проективное покрытие травостоя 70–90 %, высота достигает 40–50 см. В настоящее время население Рейнеке насчитывает всего 20 чел. и увеличивается только в летний период за счет наплыва туристов и дачников.

Климат острова муссонный, годовое количество осадков варьирует в пределах 720–1050 мм, коэффициент увлажнения больше единицы. При этом более 70 % осадков приходится на лет-

ний период. Для весны и лета характерны ветры восточных направлений, которые переносят влажный морской воздух, способствуя обильным туманам. Особенностью биоклиматических условий острова также является заметное геохимическое влияние моря на процессы почвообразования и выветривания за счет прибойного и капельно-импульверизационного привноса морских вод.

В качестве объекта исследования были выбраны буроземы темные иллювиально-гумусовые, сформированные под растительностью разных стадий антропогенных сукцессий, на участках разной удаленности от побережья. Отличительной чертой морфологического строения этих буроземов является наличие мощного, иногда до 50 см и более, иллювиально-гумусового горизонта $BMhi$ темно-серого, серого цвета с высоким содержанием гумуса, формирование которого является результатом развития в этих почвах иллювиально-гумусового процесса почвообразования [1]. В пределах острова ареалы этих буроземов приурочены к разнотравно-злаковым растительным сообществам с преобладанием в травостое полыни Гмелина (раз. 24) и растительным сообществам из молодого грабового леса, сформировавшегося на месте сгоревшего гмелинополыника (раз. 23).

Буроземы, развитые под злаково-полынной группировкой, характеризуются большей мощностью как самого профиля, так и аккумулятивно-гумусового горизонта.

Разрез 24-03 заложен на южной оконечности о. Рейнке, в 800 м юго-восточнее наибольшей вершины острова и в 100 м западнее заросшего оврага. Нижняя часть южного склона крутизной $5-7^\circ$, в 5 м от обрыва к морю. Растительность: злаково-полынная группировка, проективное покрытие 90 %, высота травостоя 40–50 см. Почва имеет следующее строение профиля: O (0–2 см) – AU (2–20 см) – $BMhi$ (20–63 см) – BM (63–109 см) – BC (109–120 см).

Разрез 23-03 заложен в 100 м на север от наибольшей вершины острова, в 400 м на запад от грунтовой дороги. Верхняя часть северного склона самой высокой на острове сопки крутизной 17° . Растительность: грабовый лес. Формула древостоя: 7Гр1Дм1Кл1Яб. Сомкнутость крон 0,8–0,9; средний диаметр древостоя 8–10 см; высота 10 м. Подлесок очень редкий: преобладает бересклет высотой 0,3 м. Травостой развит слабо и представлен селезеночником, ариземой, папоротником, мискантусом, фиалкой, волжанкой, геранью. Проективное покрытие – менее 5 %. Отмечается выход на дневную поверхность крупных (1,5×0,7 м) обломков почвообразующей породы. Их профиль включает горизонты: O (0–4 см) – AU (4–14 см) – $BMhi$ (14–43 см) – $BMhi$ (43–82 см) – BC (82–90 см).

Для исследования физико-химических показателей почв использовались общепринятые методики. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов и Mn определяли в вытяжке 5-молярной HNO_3 в соотношении почва – раствор 1:5 с атомно-адсорбционным окончанием [2]. Согласно имеющимся нормативам, тяжелые металлы, извлекаемые 5-молярной азотной кислотой, приравнивают к их валовому содержанию [1] или условно валовому [3]. Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием программы Microsoft Excel.

Обсуждение результатов исследования

Формирование микроэлементного состава буроземов острова происходит в условиях геохимического воздействия моря на процессы почвообразования и выветривания, которое ослабевает по мере удаления от побережья вглубь острова. При этом наблюдаются различия в морфологических и химических характеристиках буроземов, содержания гумуса и его профильной дифференциации.

Рассматриваемые буроземы формируются в условиях слабокислой и близкой к нейтральной реакции почвенного раствора (табл. 1). Буроземы под грабовым лесом характеризуются меньшими показателями обменной и гидролитической кислотности, большей гумусированностью аккумулятивно-гумусового горизонта и степенью насыщенности основаниями по сравнению с буроземами злаково-полынных группировок.

Профильная дифференциация содержания гумуса в буроземах острова предопределяется сочетанием аккумулятивно-гумусового и иллювиально-гумусового процессов почвообразования. Отличительной особенностью буроземов злаково-полынных группировок является нарастание интенсивности иллювиования гумуса по профилю по сравнению с буроземами под лесом. Об этом свидетельствует рост его содержания в горизонте $BMhi$ до 11,67 %. В буроземах под лесом

количество гумуса в этой части профиля значительно ниже (3,14 %). Гумификация в рассматриваемых почвах идет по фульватно-гуматному типу, что подтверждается данными группового и фракционного состава их гумуса [1]. Отношение Сгк/Сфк варьирует от 1,16 до 1,26. В буроземах злаково-полюнных группировок фульватно-гуматный состав гумуса сохраняется и в горизонте ВМhi (отношение Сгк/Сфк равно 1,02), тогда как в буроземах под грабовым лесом он сменяется на гуматно-фульватный в горизонте ВМhi (отношение Сгк/Сфк равно 0,76–0,82). По гранулометрическому составу островные буроземы относятся к классу тяжелых суглинков. Независимо от их геоморфологического положения характеризуются отчетливо выраженным оглиниванием средней части почвенного профиля.

Таблица 1 / Table 1

Основные свойства буроземов острова Рейнеке / Basic properties of burozem of Reineke Island

Горизонт, глубина отбора образца, см	Гумус, %	pH		ГК	Поглощенные катионы, Мг/экв на 100 г почвы					V, %	Фракция <0,001, %	Сгк/Сфк
		H ₂ O	KCl		По Соколову		По Гедройцу					
					Al ⁺⁺⁺	H ⁺	H ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺			
Буроземы под грабовым лесом, разрез 23												
AU, 5–14	17,12	6,12	4,36	8,93	0,05	0,06	7,95	30,94	15,62	85	12,83	1,16
ВМhi, 25–35	3,14	5,82	4,36	9,98	0,23	0,01	11,07	7,49	7,40	60	17,34	0,82
ВМhi, 45–55	1,78	6,10	4,45	6,83	0,21	0,01	9,62	7,49	4,93	56	10,80	0,76
BC, 82–90	1,16	6,06	4,4	6,30	0,21	0,01	9,24	4,99	4,40	50	12,34	–
Буроземы под злаково-полюнными группировками, разрез 24												
AU, 2–20	9,33	5,51	4,35	15,93	0,20	0,04	12,65	12,97	8,22	63	17,19	1,26
ВМhi, 25–35	11,67	5,00	4,03	19,25	0,18	0,04	19,08	6,49	12,33	50	24,89	1,02
ВМhi, 40–50, пятно	11,32	5,30	4,00	15,40	0,08	0,02	15,18	8,48	11,51	57	–	0,97
ВМhi, 40–50, фон	5,79	5,36	3,99	15,40	0,08	0,02	16,62	6,49	14,80	56	35,95	0,99

Примечание. ГК – гидролитическая кислотность; V – степень насыщенности почв основаниями.

Для оценки роли почвенных свойств в формировании их химического состава был рассчитан коэффициент корреляции между содержанием тяжелых металлов в профиле исследуемых буроземов и их основными показателями: содержанием гумуса, фракции ила, обменных катионов, а также pH и гидролитической кислотностью [4].

В качестве фонового показателя содержания в почве тяжелых металлов авторы предлагают использовать региональный средний уровень, а при его отсутствии – кларк [5]. При интерпретации полученных данных в качестве фонового содержания нами использовались региональные кларки и ПДК микроэлементов, разработанные В.И. Головым [6] для почв Приморья и учитывающие специфику и особенности почвообразования нашего региона.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что буроземы острова наиболее обогащены Mn (табл. 2). Его содержание в буроземах под грабовым лесом составляет 3 384 мг/кг, а в буроземах злаково-полюнных группировок – 24 418 мг/кг, тогда как региональный почвенный кларк – всего 1 510 мг/кг.

Профильное распределение марганца в сравниваемых буроземах носит аккумулятивный характер с максимумом его содержания в горизонте AU. С глубиной содержание Mn падает, оставаясь при этом в буроземах под грабовым лесом выше, а в буроземах злаково-полюнных группировок – ниже откорректированного кларка для почв Приморья. Существенные отличия в накоплении марганца в сравниваемых буроземах в первую очередь обусловлены биоценоотическими различиями

условий их формирования и, как следствие, зольностью поступающего опада. Наличие значимых коэффициентов корреляции между pH ($r=0,75-0,81$), обменными катионами Ca и Mg ($r=0,57$) с содержанием Mn может свидетельствовать о влиянии кислотно-основных свойств на его аккумуляцию в почвенном профиле. Mn в отличие от многих тяжелых металлов в почвах приурочен не к глинистой, а к пылеватой фракции [7]. Данное утверждение косвенно подтверждается высокой отрицательной корреляционной связью с илистой фракцией почв ($r=-0,80$). Полученные результаты близки к содержанию кислоторастворимых форм Mn в буроземах темных острова Русский [8].

Таблица 2 / Table 2

Содержание тяжелых металлов в буроземах острова Рейнеке, мг/кг
/ Heavy metal content in burozem of Reineke Island, mg/kg

Горизонт, см	Тяжелые металлы							
	Pb	Ni	Zn	Cr	Co	Cu	Cd	Mn
Буроземы под грабовым лесом, разрез 23								
AU, 5–14	26,85	12,74	102,13	16,18	38,41	36,79	1,12	3384,77
BMhi, 25–35	0,82	14,97	69,59	19,28	31,02	33,67	0,13	2716,32
BMhi, 45–55	6,69	17,11	59,46	16,39	5,01	28,65	0,30	1979,01
Буроземы под злаково-попынными группировками, разрез 24								
AU, 2–20	14,7	20,02	685,78	19,33	22,08	175,90	0,62	2441,13
BMhi, 25–35	63,08	17,48	74,60	29,83	20,55	28,09	7,41	1298,38
BMhi, 40–50, пятно	17,30	18,46	74,83	30,96	18,15	28,74	0,42	1157,11
BMhi, 40–63, фон	22,07	19,50	71,04	25,22	16,04	26,90	0,18	1151,96
Региональный кларк	32	46	70	66	22	20	0,6	1510
ПДК для почв Приморья	300	100	150	100	70	100	3	4000
Среднее содержание в гранитах	14,94	14,48	53,20	17,69	4,02	72,56	–	625,6

Диапазон содержания Pb в исследуемых нами почвах варьирует широко – от 0,82 до 63,08 мг/кг – и не превышает установленных для почв Приморья ПДК. Распределение по профилю в буроземах под грабовым лесом неравномерное. Отмечается активное накопление Pb в поверхностных горизонтах, при этом в нижней части горизонта BMhi фиксируется уменьшение степени его подвижности вследствие снижения уровня почвенной кислотности. В буроземах злаково-попынных группировок наблюдается несколько иная картина: концентрация свинца увеличивается почти в два раза по сравнению с буроземами под грабовым лесом, а распределение по профилю имеет четко выраженный элюво-иллювиальный тип. Свинец проявляет сродство с органическими комплексами и, как следствие, показывает заметную положительную корреляционную связь с гумусом ($r=0,56$) [9]. Кроме того, исследование соединений свинца в почвах с различным уровнем увлажнения показало, что с ростом влажности почвы увеличивается содержание обменных соединений свинца, которые в дальнейшем способны закрепляться органическим веществом почв [10]. Буроземы гмелинопопынников формируются на участке, испытывающем дополнительное увлажнение в процессе импульверизации морских вод, что может служить одной из причин повышенной адсорбции свинца в их профиле.

По уровню накопления Zn и Cu в почвах на исследуемой территории был выявлен участок с локальным антропогенным загрязнением этими элементами. В буроземах под злаково-попынными группировками содержание цинка в поверхностном горизонте в 4,6 раза превышает ПДК для почв Приморья, а по уровню концентрации меди – в 1,8 раза. Высокие показатели по содержанию цинка и меди для буроземов данного участка объясняются его близостью к бухте, используемой горожанами для отдыха в летний период (5 м от береговой зоны). Разведение костров и сжигание бытового мусора, особенно изделий из латуни, могло привести к повышенному накоплению этих тяжелых металлов в почве. В буроземах под лесом содержание как Zn, так и Cu не превышает фоновых показателей. Профильное распределение этих элементов имеет аккумулятивный характер для всех рассматриваемых почв. Цинк и медь относятся к элементам, отличающимся высокой аккумуляцией в почвенном профиле органическим веществом. По результатам

корреляционного анализа установлена высокая степень связи между содержанием кислоторастворимых соединений Zn и Cu с содержанием гумуса, но только для буроземов под лесом. Для буроземов злаково-полынных группировок она проявляется как слабозначимая, что является отражением локального загрязнения этими элементами.

Данные по содержанию Ni и Cr во всех буроземах острова ниже значений регионального кларка и ПДК и сравнимы с результатами, полученными для буроземов темногомусовых прибрежной части Приморья [8]. Однако отмечаются определенные различия в содержании и распределении по профилю хрома и никеля в буроземах различных участков. В буроземах под лесом содержание никеля ниже, чем в буроземах злаково-полынной группировки, и имеет элюво-иллювиальное внутрипрофильное распределение. Тогда как буроземы злаково-полынных группировок отличаются слабовыраженной аккумуляцией никеля в верхней части профиля. Согласно опубликованным данным, никель проявляет сродство с глинистыми минералами, активно адсорбируясь в основном в илстой фракции ($r=0,57$) [10–12]. Это косвенно подтверждается заметным коэффициентом корреляции между содержанием илстой фракции и никеля ($r=0,63$).

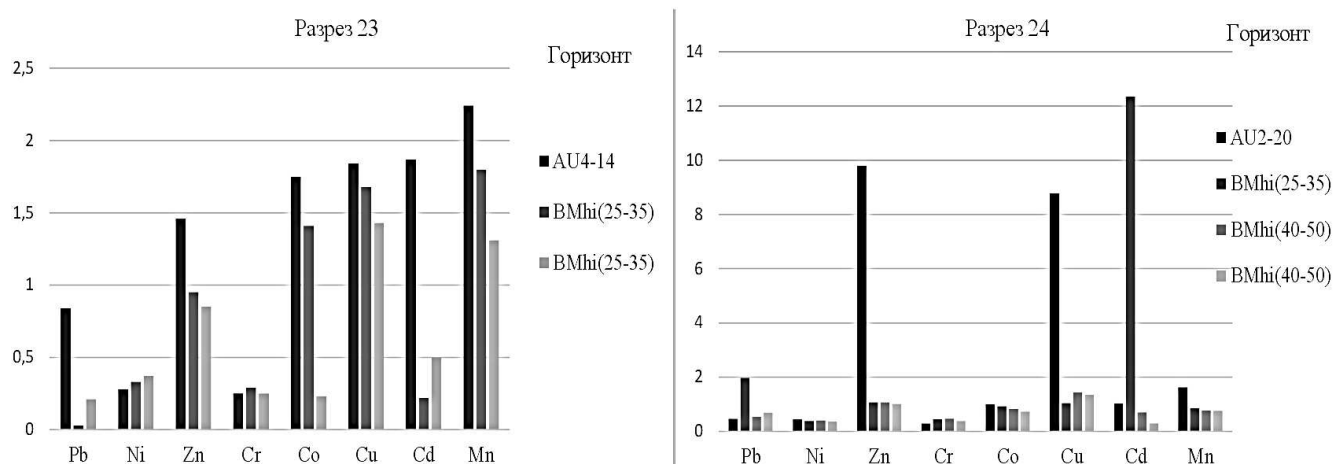
Для Cr также характерна приуроченность к илстой фракции: его содержание выше в буроземах гмелинополынных, в которых процессы оглинивания выражены сильнее. Это формирует высокую корреляционную степень связи между содержанием Cr и илстой фракции ($r=0,86$). Внутрипрофильное распределение хрома в рассматриваемых почвах имеет однотипный характер с выраженным накоплением в иллювиальном горизонте их профиля [12].

Из всех изученных тяжелых металлов наиболее равномерным распределением по генетическим горизонтам исследованных почв отличается Co. Уровень аккумуляции кобальта в буроземах острова не превышает фонового ПДК для почв Приморья. В почвах под злаково-полынными группировками фиксируется его наименьшее содержание, а распределение по профилю имеет аккумулятивный тип. В почвах под лесом сохраняется аккумулятивный характер распределения Co, но его содержание возрастает почти в 1,7 раза в гумусовом горизонте и в 1,5 раза – в BМhi горизонте по сравнению с таковым в буроземах гмелинополынных. Такие колебания данных по содержанию кобальта в буроземах острова, очевидно, связаны с особенностями биологического накопления микроэлементов в почвах под различной растительностью. В отношении соединений кобальта установлена умеренная связь с содержанием обменного кальция, а также суммой обменных оснований в почве ($r=0,41$). Немаловажная роль в закреплении Co в буроземах острова принадлежит и гидроксидам марганца [8]. Корреляционная связь Co с Mn оценивается как заметная ($r=0,61$).

Содержание Cd в буроземах рассматриваемых участков варьирует в широком диапазоне. В буроземах под лесом содержание кадмия не превышает регионального уровня ПДК с аккумулятивным типом его профильного распределения (1,12 мг/кг – в горизонте AU и 0,3 мг/кг – в BМhi-горизонте). В буроземах злаково-полынных группировок содержание кадмия в 2,5 раза превышает фоновое значение ПДК и имеет резко выраженный элюво-иллювиальный характер внутрипрофильного распределения (0,62 мг/кг – в горизонте AU и 7,41 мг/кг – в BМhi-горизонте), что может быть связано с его антропогенным поступлением. Выявленные особенности накопления кадмия в буроземах острова предопределяются, на наш взгляд, в первую очередь различиями в процессах гумусообразования в буроземах различных участков, проявляющимися в специфике внутрипрофильной динамики гумуса и его отдельных фракций [1]. Повышение содержания кадмия в средней части профиля буроземов гмелинополынных связано, на наш взгляд, со сродством кадмия с органическими комплексами почв и усилением подвижности последних в профиле буроземов злаково-полынных группировок. Помимо этого, в составе гумуса этих буроземов по сравнению с буроземами под лесом в иллювиально-гумусовом горизонте увеличивается долевое участие органического вещества илстой и тонкопылеватой фракций, отвечающих за сорбцию тяжелых металлов в горизонтах с большим содержанием гумуса [1]. Результаты корреляционного анализа подтвердили заметную роль гумуса в закреплении Cd в островных буроземах ($r = 0,50$).

В целом полученные пределы колебаний концентраций тяжелых металлов в буроземах острова сопоставимы с имеющимися в литературе данными по геохимическому составу почв прибрежной части юго-западного Приморья [8, 11].

Для характеристики накопления тяжелых металлов в почвенном профиле использовали коэффициент концентрации элементов (Kc) по отношению к фоновым значениям (откорректированным региональным кларкам) (рисунок).



Значения коэффициента концентрации тяжелых металлов (Kc) в буроземах острова Рейнеке
/ Values of the concentration coefficient of heavy metals (Kc) in buruzem of Reineke Island

Сравнение полученных коэффициентов концентрации в буроземах острова позволило установить, что в исследуемых почвах происходит активное накопление в поверхностных горизонтах марганца, цинка и меди, а в иллювиальных горизонтах – кадмия и свинца. Наиболее высокие коэффициенты концентрации фиксируются в профиле буроземов злаково-полынных группировок. Для этих буроземов выявлены повышенные коэффициенты концентрации для цинка, меди и кадмия, что, на наш взгляд, связано с антропогенным воздействием.

Заключение

Результаты исследований содержания тяжелых металлов в буроземах острова Рейнеке свидетельствуют о преобладающем влиянии особенностей почвообразования на их содержание и распределение на участках, удаленных от побережья. По мере приближения к береговой зоне и любимым местам отдыха туристов повышается роль антропогенного фактора в аккумуляции и закреплении тяжелых металлов в профиле распространенных здесь буроземов. Согласно полученным коэффициентам концентрации, в исследуемых почвах в процессе почвообразования накапливаются Mn, Cd, Cu, Co, Zn. Максимальные значения коэффициента концентрации в буроземах злаково-полынных группировок указывают на поверхностное загрязнение Cu и Zn, а горизонта BMhi – Cd. Количественные показатели содержания соединений Pb, Cd определяются распределением органического вещества почв, а Cr, Ni – илстой фракции. Для сорбции Mn значимым фактором являются кислотно-основные свойства почв. Это подтверждается наличием высоких коэффициентов корреляции между содержанием соединений Mn и pH в почвенном растворе, содержанием обменных оснований и заметных в отношении Pb, Cd с гумусом и Cr, Ni с илстой фракцией. Для Zn, Cu высокие коэффициенты корреляции с гумусом были получены только для буроземов под лесом, для буроземов гмелинополынных они слабые вследствие резкого роста их концентраций на фоне антропогенного воздействия. Полученные данные свидетельствуют о необходимости проведения дальнейшего экологического мониторинга территории острова в целях оценки влияния нерационального природопользования на почвенный покров.

Список источников

1. Латышева Л.А. Роль органического вещества илстой фракции в динамике качественного состава гумуса буроземов острова Рейнеке // Вестн. Томского гос. ун-та. Биология. 2015. № 3 (31). С. 17–26.
2. РД 52.18.191 89. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом в лабораториях Общегосударственной службы наблюдения и контроля загрязнения природной среды. М., 1990. 32 с.

3. Нестерова О.В., Трегунова В.Г., Семаль В.А. Использование нормативных документов для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1161–1166.
4. Кремлев А.Г. Математика. Екатеринбург: Изд-во УрГЮА, 2001. 140 с.
5. Волгин Д.А. Фоновый уровень и содержание тяжелых металлов в почвенном покрове Московской области // Вестн. Московского гос. областного ун-та. Серия: Естеств. науки. 2009. № 3. С. 90–96.
6. Голов В.И., Тимофеев С.А. Экологические и агрохимические основы производства и применения минеральных удобрений из местного агросырья на почвах Дальнего Востока // Вестн. Тихоокеанского гос. экон. ун-та. 2006. № 3 (39). С. 110–124.
7. Водяницкий Ю.Н. Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах // Почвоведение. 2014. № 4. С. 420–432.
8. Латышева Л.А. Тяжелые металлы в буроземах острова Русский // Успехи современного естествознания. 2017. № 8. С. 94–99.
9. Водяницкий Ю.Н., Плеханова И.О. Биогеохимия тяжелых металлов в загрязненных переувлажненных почвах (аналитический обзор) // Почвоведение. 2014. № 3. С. 273–282.
10. Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Биогеохимия углерода, железа и тяжелых металлов в переувлажненных почвах (аналитический обзор) // Вестн. Московского ун-та. Серия 17: Почвоведение. 2015. № 3. С. 3–12.
11. Жарикова Е.А. Особенности геохимического состава почв прибрежной части юго-западного Приморья // Изв. Иркутского гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 40. С. 27–42.
12. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Reference

1. Latysheva L.A. The role of clay fraction organic matter in the dynamics of the qualitative composition of humus burozems of Reineke Island. *Vestn. Tomskogo gos. un-ta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2013;(3):17-26. (In Russ.).
2. RD 52.18.191-89. *Methodological Guidelines. Determination of the Mass Portion of Acid-Soluble Forms of Heavy metals (Coper, Lead, Zink, Nicel, Cadmium, Cobalt, Chromium, and Manganese) in Soils by the atomic Absorption Method in laboratories of the environmental Monitoring Service*. Moscow, 1990. 32 p. (In Russ.).
3. Nesterova O.V., Tregubova V.G., Semal V.A. Use of regulatory documents for assessing the contamination of soils with heavy metals. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(11):1161-1166.
4. Kremlev A.G. *Mathematics*. Yekaterinburg: Ural State Law University Press; 2001. 140 p. (In Russ.).
5. Volgin D.A. Background level and content of heavy metals in the soil cover of the Moscow region. *Vestn. Moskovskogo gos. oblastnogo un-ta. Seriya: Estestv. nauki = Bulletin of Moscow State Regional University. Natural Sciences*. 2009;(3):90-96. (In Russ.).
6. Golov V.I., Timofeev S.A. Ecological and agrochemical bases of production and application of mineral fertilizers from local agricultural raw materials on soils of the Far East. *Izvestiya Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Ekonomika i upravlenie = The Bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management*. 2006;(3):110-124. (In Russ.).
7. Vodyanitskii Y.N. Natural and technogenic compounds of heavy metals in soils. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(4):255-265.
8. Latysheva L.A. Heavy metals in the brown soils of the Russian island. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2017;(8):94-99. (In Russ.).
9. Vodyanitskii Y.N., Plekhanova Y.N. Biogeochemistry of heavy metals in contaminated excessively moistened soils (Analytical review). *Eurasian Soil Science*. 2014;47(3):153-161.
10. Vodyanitskii Y.N., Shoba S.A. Biogeochemistry of carbon, iron and heavy metals in wetland (analytical review). *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2015;70(1):10-12.
11. Zharikova E.A. Features of the geochemical composition of soils of the southwestern part of the pacific coast of Russia. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences*. 2022;40:27-42. (In Russ.).
12. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Microelements in the soil and plants*. Moscow: Mir Publ.; 1989. 439 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Л.А. Латышева – научный сотрудник, лаборатория биогеографии и экологии.

Information about the author

L.A. Latysheva - Researcher, Laboratory of Biogeography and Ecology.

Статья поступила в редакцию 24.07.2023; одобрена после рецензирования 07.08.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 24.07.2023; approved after reviewing 07.08.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья

УДК 504.055

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-97-104

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ГОРОДА РОСТОВА-НА-ДОНУ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Григорий Юрьевич Скляренко^{1✉}, Георгий Романович Шехурдин²

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

¹gysklyarenko@sfnu.ru✉

²shehurdin@sfnu.ru

Аннотация. Тепловые поля, имеющие природное и антропогенное происхождение, – неотъемлемая часть городской среды обитания, оказывающая влияние на функционирование её компонентов, а также определяющая условия существования живых организмов и человека. Населённые пункты выступают областями формирования обширных температурных аномалий, главным образом положительных, известных как городской остров тепла. Это явление было открыто более 200 лет назад и в настоящее время детально исследовано. Однако изучение аномалий меньшего масштаба – районного и локального – также представляет научный и практический интерес. Эти неоднородности распределения тепловой энергии обусловлены наличием или функционированием отдельных объектов, а потому, с одной стороны, оказывают непосредственное влияние на состояние окружающей среды и условия жизни и деятельности человека, а с другой – являются перспективной областью развития экологического проектирования и рационального обустройства населённых пунктов. В рамках проведённого исследования были выявлены основные закономерности пространственного распределения температуры земной поверхности в пределах городского округа Ростов-на-Дону, а также определены области формирования аномалий локального и районного масштаба и объекты и процессы, способствующие их возникновению. Полученные выводы могут быть использованы для дальнейшего изучения эколого-геофизических особенностей городских ландшафтов, а также имеют прикладное значение в рамках определения направления и последствий воздействия развития конкретных видов градостроительного освоения территории.

Ключевые слова: Ростов-на-Дону, урбандиафты, урбоэкосистема, природно-антропогенная система, геофизические поля, тепловые поля, тепловые аномалии, городской остров тепла, городской климат, дистанционное зондирование Земли

Для цитирования: Скляренко Г.Ю., Шехурдин Г.Р. Особенности теплового поля города Ростова-на-Дону по данным дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 97–104.

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

Original article

FEATURES OF THE THERMAL FIELD OF THE CITY OF ROSTOV-ON-DON ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

Grigory Yu. Sklyarenko^{1✉}, Georgy R. Shehurdin²

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

¹gysklyarenko@sfnu.ru✉

²shehurdin@sfnu.ru

© Скляренко Г.Ю., Шехурдин Г.Р., 2024

Abstract. Thermal fields of natural and anthropotechnogenic origin are an integral part of the urban habitat, which influences the functioning of its components, as well as determines the conditions of existence of living organisms including humans. Settlements act as areas of formation of extensive temperature anomalies, mainly positive ones, known as urban heat island. This phenomenon was discovered more than 200 years ago and is currently being investigated in detail. However, the study of smaller anomalies - neighbourhood-scaled and local - is also a subject of scientific and practical interest. These heterogeneities in the distribution of thermal energy are caused by the presence or functioning of individual objects, and therefore, on the one hand, have a direct impact on the state of the environment and human living conditions, and on the other hand, are a promising area for the development of environmental engineering and settlement rational arrangement. As part of the conducted research, the main patterns of spatial distribution of the Earth's surface temperature within the Rostov-on-Don city district were identified, as well as the areas of formation of anomalies of local and neighbourhood scale and objects and processes contributing to their formation were identified. The results and conclusions can be used for further study of ecological and geophysical features of urban landscapes, and also have an applied value in determining the direction and consequences of the impact of the advancement of specific types of urban development of the territory.

Keywords: Rostov-on-Don, urban landscapes, urban ecosystem, natural-anthropogenic system, geophysical fields, thermal fields, thermal anomalies, urban heat island, urban climate, remote sensing

For citation: Sklyarenko G.Yu., Shehurdin G.R. Features of the Thermal Field of the City of Rostov-on-Don According to Remote Sensing Data. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):97-104. (In Russ.).

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

Введение

Природно-антропогенные тепловые поля – важная составляющая городского ландшафта, выступающая одним из факторов среды обитания живых организмов в пределах урбанизированных территорий и формирующая условия жизни и деятельности населения. Их пространственно-временное распределение обусловлено сочетанием природно-климатической и антропогенной составляющих, что способствует возникновению сложной разнородной структуры, отличающейся от прилегающих природных ландшафтов и агроценозов и представляющей, как правило, обширную положительную аномалию – городской остров тепла [1]. При этом, согласно данным математического моделирования, разница температур городских территорий и прилегающих ландшафтов, в частности на Юге России, может достигать 6–8 °С [2].

В то же время в границах населённого пункта можно выделить аномалии меньшего порядка, в отдельных случаях – не менее контрастные, чем общегородские, обусловленные локальными источниками тепловой энергии – промышленными, транспортными, коммерческими объектами, районами плотной застройки и экранированными поверхностями. Дополнительную неоднородность вносят элементы ландшафта, препятствующие распространению тепла и способствующие поглощению солнечной энергии. К таковым относятся городские леса, парки, скверы, уличное и внутриквартальное озеленение и иные территории с развитым растительным покровом [3, 4].

Неоднородности структуры температурного поля города районного и локального масштаба представляют интерес как источники прямого и косвенного воздействия на здоровье человека и состояние окружающей среды. В наибольшей мере это касается положительных аномалий, условия в пределах которых способствуют накоплению загрязняющих веществ в воздухе и снижению уровня ультрафиолетового излучения (на десятки процентов), что приводит к распространению инфекционных агентов и ухудшению эпидемиологической обстановки по респираторным заболеваниям [1, 5]. Структура теплового поля также выступает основой формирования ветрового режима урбандо-ландшафта, обуславливая возникновение «городских бризов» и «коридорных ветров», переносящих загрязняющие вещества из промышленных зон в жилые районы [1]. Изменение температуры поверхности городской среды может считаться независимым показателем темпов строительства и, как следствие, интенсивности воздействия на окружающую среду города [6].

В рамках проведённого исследования были определены параметры структуры городского теплового поля Ростова-на-Дону, выделены его аномалии районного и локального масштаба в пределах городского округа, а также определены источники и причины их формирования.

Объект исследования

Город Ростов-на-Дону расположен на юге европейской части России, в низовьях реки Дон. Климат по Кёппену – Гейгеру – влажный континентальный с жарким летом (Dfa) [7]. Средняя температура января составляет -3°C , июля – 24°C , однако абсолютный максимум температур достигает $40,2^{\circ}\text{C}$. В течение года в среднем 151 ясный день (по нижней облачности) приходится главным образом на период с мая по сентябрь [8]. Указанные обстоятельства определяют значительный приток прямой солнечной радиации (до 866 Вт/м^2 на горизонтальную поверхность при ясном небе), во многом способствуют формированию достаточно мощной городской тепловой аномалии [9]. В то же время в последние годы в Ростове-на-Дону наблюдается активное строительство жилых и общественных зданий, сопровождающееся увеличением площади экранированных поверхностей (дороги, парковки, автостоянки, площади) и уменьшением плотности уличного и внутриквартального озеленения. Это приводит к росту температуры поверхности и формированию новых тепловых аномалий [6, 10].

Материалы и методы исследования

В качестве источника информации о мощности теплового излучения на территории города были использованы данные дистанционного спутникового зондирования, полученные ИСЗ Landsat 8 и 9. Данные аппараты оборудованы сенсорами TIRS/TIRS-2, работающими в дальнем инфракрасном (тепловом) диапазоне. В рамках исследования были использованы снимки спектрального канала 10 с диапазоном длин волн $10,45\text{--}11,20 \text{ мкм}$, на который приходится максимум собственного излучения минеральных поверхностей, что позволяет эффективно выявлять городской остров тепла на уровне поверхности Земли [11, 12]. Использовались снимки тёплого сезона 2020–2022 гг. (с мая по сентябрь), что обусловлено особой актуальностью проблемы антропогенного теплового загрязнения и формирования аномалий теплового поля на фоне характерных для Ростова-на-Дону высоких летних температур. Для первичной обработки исходных материалов и получения значений температуры поверхности использовались геоинформационная система QGIS и модуль Semi-Automatic Classification Plugin [13].

Были определены средние, максимальные и минимальные значения температуры поверхности в границах городского округа и вычислена величина температурной аномалии как разность фактического значения точки и средней по городу величины. Затем полученные значения были усреднены для определения среднесезонной структуры теплового поля. По результатам вычисления была составлена карта усреднённых значений температурной аномалии (рис. 1). В дальнейшем были выделены территории и объекты, имеющие черты областей распространения и локализации температурных аномалий, т.е. в значительной мере выделяющиеся среди прилегающих ландшафтов (рис. 2).

Результаты исследования и выводы

Структура аномалий теплового поля в пределах городского округа Ростов-на-Дону приведена на рис. 1. Полученная усреднённая величина отклонения от среднегогородского значения в тёплый сезон охватывает диапазон от $-7,5$ до $15,9^{\circ}\text{C}$.

Величина аномалии закономерно увеличивается по мере приближения к центральной части городского округа, достигая там преобладающих значений порядка $+3\text{--}4^{\circ}\text{C}$, а в полупериферийных и периферийных областях – до $+1\text{--}3^{\circ}\text{C}$.

Отрицательные величины сосредоточены главным образом на окраинах города, в южной и юго-западной части, где распространены включённые в городскую черту природные и агроландшафты. Таким образом, в пределах городского округа наблюдается достаточно выраженное явление острова тепла.

В то же время в пределах города был выделен ряд участков, для которых характерны значительные отклонения температурной аномалии, не вписывающиеся в указанную выше тенденцию. Как правило, такие неоднородности связаны с отдельными объектами и урболодшафтными элементами и в значительной мере влияют на микроклиматические условия прилегающих территорий [4]. Расположение таких выраженных как положительных, так и отрицательных тепловых аномалий представлено на рис. 2, а их особенности приведены в таблице.

Городской округ Ростов-на-Дону

Усреднённая температурная аномалия

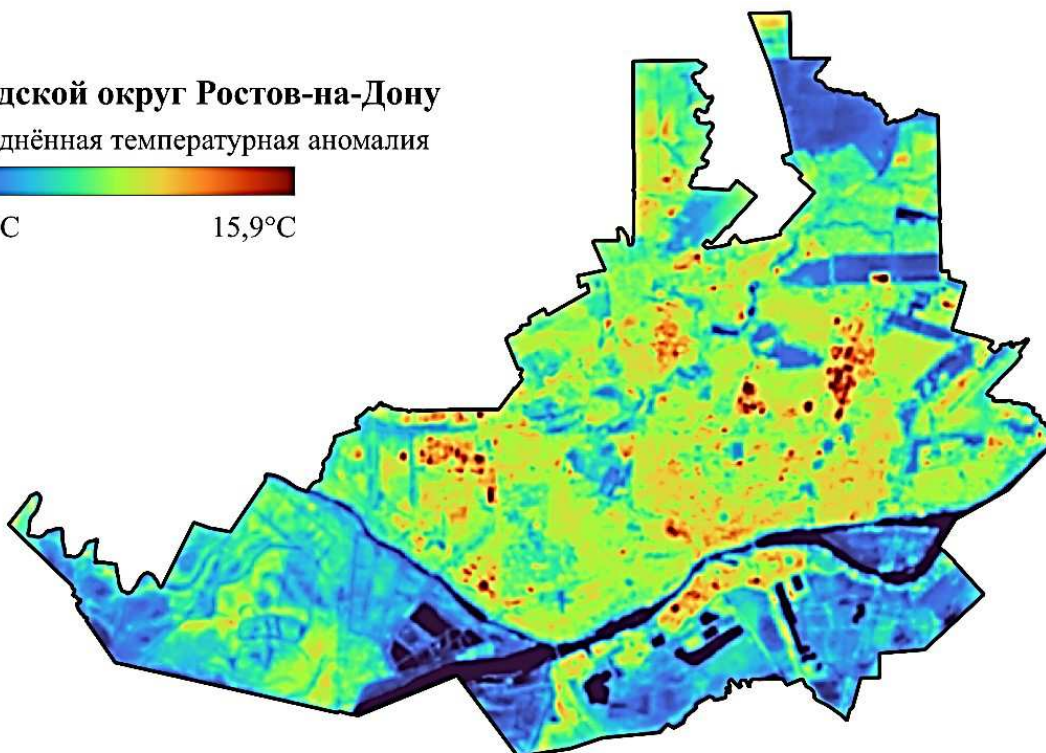
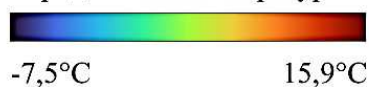


Рис. 1. Карта распределения усреднённой величины температурной аномалии на территории городского округа Ростов-на-Дону / Fig. 1. Map of the distribution of the average temperature anomaly in the territory of the Rostov-on-Don urban district

Городской округ Ростов-на-Дону

Усреднённая температурная аномалия

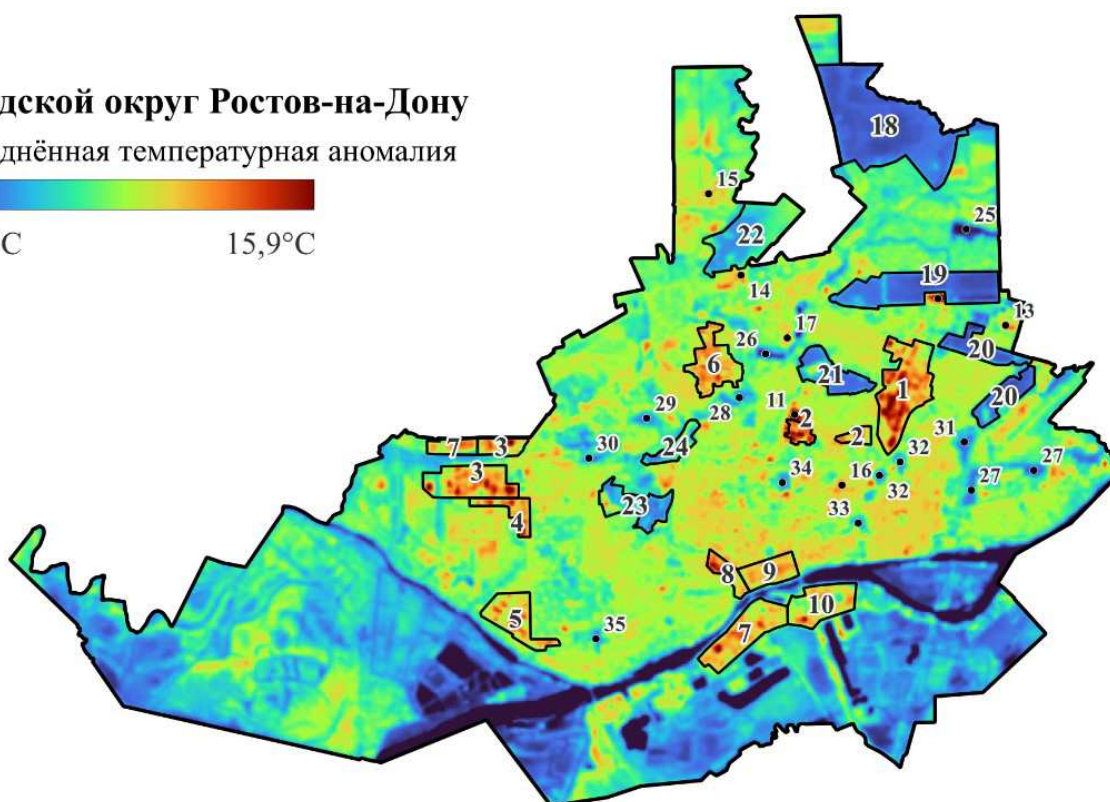


Рис. 2. Тепловые аномалии районного и локального масштаба в пределах городского округа Ростов-на-Дону. Расшифровка нумерации – в таблице / Fig. 2. Thermal anomalies of regional and local scale within the urban district of Rostov-on-Don. See table for decoding

**Тепловые аномалии районного и локального масштаба в пределах г. Ростова-на-Дону
и факторы их формирования / Thermal anomalies of regional and local scale
within the city of Rostov-on-Don and factors of their formation**

№ (рис. 2)	Объект	Усреднённая температурная аномалия, °С	Факторы формирования температурной аномалии
<i>Положительные тепловые аномалии районного масштаба</i>			
1	Промышленная зона Сельмаш – ул. Орская	2,9–11,5	Производственные выбросы тепла; нагрев экранированных поверхностей
2	Промышленная зона завода «Роствертол»	3,1–12,4	
3	Западная промышленная зона	2,5–12,1	
4	Торгово-коммерческая зона – ул. Малиновского	4,2–11,7	
5	Юго-Западная промышленная зона	2,0–10,7	
6	Промышленная зона Каменка	2,6–8,4	
7	Заречная промышленная зона	2,2–11,9	
8	Район станции Ростов-Главный	4,1–9,8	Преимущественно нагрев экранированных поверхностей; транспортные выбросы тепла
9	Исторический центр Ростова-на-Дону	2,6–6,7	Нагрев экранированных поверхностей, зданий и сооружений; транспортные выбросы тепла
10	Рекреационная зона. Левый берег Дона	2,0–10,2	Нагрев экранированных поверхностей
<i>Положительные аномалии локального масштаба (отдельные объекты)</i>			
11	ТЦ «Горизонт»	14,4	Преимущественно нагрев зданий, сооружений и экранированных поверхностей
12	ТЦ «Меркурий»	15,9	
13	Завод «Алмаз»	9,4	
14	Автобусный парк РМПАТП-6	9,4	
15	Торгово-коммерческая зона мкр. Суворовский	7,9	
16	Район пл. Химиков	7,9	
17	Северный рынок	7,5	
<i>Отрицательные тепловые аномалии районного масштаба</i>			
18	Щепкинский лес	–4,5	Транспирация с поверхности растительного покрова; затенение поверхности почвы древесной растительностью
19	Гемерницкая роща и прилегающие насаждения	–4,8	
20	Насаждения 2-го пос. Орджоникидзе	–5,0	
21	Чкаловская роща и роща СКА	–3,9	
22	Северное кладбище	–3,3	
23	Ботанический сад ЮФУ и прилегающие территории	–3,6	Транспирация с поверхности растительного покрова; затенение поверхности почвы древесной растительностью; испарение с поверхности водоёмов
24	Территория Ростовского зоопарка	–4,0	
<i>Отрицательные тепловые аномалии локального масштаба (отдельные объекты)</i>			
25	Водохр. Ростовское море	–6,0	Испарение с поверхности водоёмов
26	Северные водохранилища	–5,7	
27	Александровская роща	–4,5	Транспирация с поверхности растительного покрова; Затенение поверхности почвы древесной растительностью
28	Санаторий «Надежда»	–3,4	
29	Соловьинная роща	–3,5	
30	Змиевская балка	–3,9	
31	Парк Авиаторов	–3,8	
32	Парк им. Островского	–3,2	
33	Парк Революции	–2,8	
34	Братское кладбище	–3,0	
35	Ниже-Гниловское кладбище	–3,6	

Положительные аномалии главным образом сгруппированы в центральной, западной и северо-восточной частях городского округа, при этом наиболее масштабные из них приурочены к промышленным и коммерческим зонам и объектам. В то же время три крупнейшие по величине отклонения аномалии формируются расположенными достаточно компактно зданиями и комплексами зданий (ТЦ «Меркурий», ТЦ «Горизонт» и промышленная зона завода «Роствертол»), влияние которых, будучи ограниченным пространственно, всё же создаёт значительный (до десятков градусов) температурный градиент, кратно превосходящий характерные значения для других районов города, что говорит о необходимости учёта таких локальных эффектов при планировании и благоустройстве городской среды.

Отрицательные аномалии тяготеют к северо-востоку и востоку Ростова-на-Дону, их происхождение связано с обширными озеленёнными территориями в этой части города, нарушающими непрерывность застройки. Охлаждающий эффект городских лесов и парков, даже протяжённых территориально, ниже теплового воздействия большинства положительных аномалий более чем в 2 раза по величине отклонения. При этом особенностью отрицательных аномалий является преобладание в их числе малых объектов и объектов, характеризующихся малой (в сравнении с положительными аномалиями) контрастностью проявления.

Всё вышеуказанное позволяет сделать вывод о существовании на территории Ростова-на-Дону при текущем характере освоения территории благоприятных условий для формирования контрастных положительных тепловых аномалий, влияние которых значительно превосходит охлаждающее воздействие городского озеленения и водных объектов.

Заключение

1. В ходе исследования были выявлены основные закономерности распределения теплового поля в границах городского округа Ростов-на-Дону в тёплый сезон года. Выявлен общегородской остров тепла с величиной усреднённой аномалии до 3–4 °С, охватывающий застроенные районы населённого пункта.

2. Выделены тепловые аномалии, к которым отнесены районы и участки, характеризующиеся значительным отличием тепловых характеристик от прилегающих территорий. Определены источники и факторы формирования таких аномалий: положительные образуются преимущественно в промышленных и коммерческих зонах, отрицательные связаны с озеленёнными территориями, лесными массивами и водными объектами.

3. Наиболее контрастные аномалии на территории Ростова-на-Дону – положительные. Они связаны с объектами локального значения – компактными коммерческими и производственными объектами. Отрицательные аномалии отличаются меньшей контрастностью и численным преобладанием малых объектов.

4. В пределах города при нынешнем характере землепользования наблюдаются условия, способствующие возникновению областей повышенной температуры, что способствует усугублению эффекта городского острова тепла и возникновению неблагоприятных явлений локального и районного масштаба, что должно быть учтено при дальнейшем градостроительном планировании и благоустройстве территории.

Список источников

1. *Алексашина В.В., Ле Минь Туан.* Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 36–40.
2. *Гиясов А.И.* Значение городского острова тепла в регулировании микро- и эклимата // Вестн. ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 1. С. 5–15.
3. *Бурченко Г.Д., Прокопчик Е.А., Чумаков Е.А., Шлендер Т.В.* Изучение теплового поля территории г. Могилева по данным спутника Landsat-8 // ГИС-технологии в науках о Земле: материалы респ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых. Минск : БГУ, 2020. С. 171–177.

4. Погорелов А.В., Липилин Д.А. Тепловой портрет города Краснодара. Поиск тепловых аномалий // Географические исследования Краснодарского края : сб. науч. тр. / под общ. ред. А.В. Погорелова. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2016. Вып. 10. С. 219–231.
5. Heaviside C., Macintyre H., Vardoulakis S. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment // *Current Environmental Health Reports*. 2017. Vol. 4 (3). P. 296–305.
6. Горный В.И., Лялько В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Филиппович В.Е., Станкевич С.А., Бровкина О.В., Киселев А.В., Давидян Т.А., Лубский Н.С., Крылова А.Б. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 176–191.
7. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated // *Meteorologische Zeitschrift*. 2006. Vol. 15, № 3. S. 259–263.
8. Климат Ростова-на-Дону // Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/34730.htm?ysclid=libosax4ev475189489> (дата обращения: 31.05.2023).
9. ТСН 23-339-2002. Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий. Нормативы по энергопотреблению и теплозащите. Ростов н/Д., 2002.
10. Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С. Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 5. С. 125–141.
11. Landsat 9 bands // Landsat science. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-bands/> (дата обращения: 31.05.2023).
12. Грищенко М.Ю., Калитка Л.С. Изучение сезонной изменчивости теплового поля Краснодара по космическим снимкам со спутника Landsat 8 // ИнтерКарто. ИнтерГИС: материалы Междунар. конф. М.: Изд-во Московского гос. ун-та, 2019. Т. 25, № 2. С. 101–111.
13. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 5.3.2.1. 2017. 272 p.

References

1. Aleksashina V.V., Le Minh Tuan. Influence of the urban heat island effects on the ecology of the megacity. *Problemy regional'noy ekologii = Regional Environmental Issues*. 2018;(5):36-40. (In Russ.).
2. Giyasov A.I. The significance of an urban heat island in the regulation of micro- and eco-climates. *Vestn. YuUrGU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of the South Ural State University. Construction Engineering and Architecture*. 2023;23(1):5-15. (In Russ.).
3. Burchenko G.D., Prakopchik Y.A., Chumakov E.A., Schlender T.V. Study of the thermal field of the territory of the city of Mogilev using data from the Landsat 8 satellite. *GIS in science of the Earth*. Materials of the Republican Scientific and Practical Seminar of students and young scientists. Minsk: Belarusian State University Press; 2020:171-177. (In Russ.).
4. Pogorelov A.V., Lipilin D.A. The thermal portrait of the city of Krasnodar based on satellite images. *Geographical research of the Krasnodar Territory : collection of scientific works*. Krasnodar: Kuban State University Press; 2016;(10):219-231. (In Russ.).
5. Heaviside C., Macintyre H., Vardoulakis S. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*. 2017;4(3):296-305.
6. Gorny V.I., Lyalko V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Filippovich V.E., Stankevich S.A., Brovkina O.V., Kiselyov A.V., Davidyan T.A., Lubsy N.S., Krylova A.B. Forecast of the thermal reaction of the urban environment of St. Petersburg and Kiev on climate change (based on the materials of surveys by EOS and Landsat satellites). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2016;13(2):176-191. (In Russ.).
7. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. 2006;15(3):259-263.
8. Climate of Rostov-on-Don. *Weather and climate*. Available from: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/34730.htm?ysclid=libosax4ev475189489> [Accessed 31st May 2023]. (In Russ.).
9. TSN 23-339-2002. *Energy efficiency in residential and public buildings. The Norms for Thermal Performance of the Buildings*. Rostov-on-Don, 2002. (In Russ.).
10. Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S. Analysis of the effect of soil sealing and landscaping on the thermal field of the Volgograd agglomeration according to MODIS. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2020;17(5):125-141. (In Russ.).

11. Landsat 9 bands. *Landsat science*. Available from: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-bands/> [Accessed 31st May 2023].

12. Grishchenko M.Yu., Kalitka L.S. Studying the seasonal variability of thermal field of Krasnodar using Landsat 8 satellite imagery. *InterCarto. InterGIS*. Proceedings of the International Conference. Moscow: Moscow State University Press; 2019;25(2):101-111. (In Russ.).

13. Congedo L. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. Release 5.3.2.1. 2017. 272 p.

Информация об авторах

Г.Ю. Скляренок – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле.

Г.Р. Шехурдин – магистрант, Институт наук о Земле.

Information about the authors

G.Yu. Sklyarenko - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Head of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences.

G.R. Shehurdin - Master's Student, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 30.06.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 30.06.2023; approved after reviewing 29.11.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья

УДК 911.2:556.11

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-105-117

МЕТАН И СУЛЬФИТРЕДУЦИРУЮЩИЕ КЛОСТРИДИИ КАК ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЛОИДОВ ГИПЕРСОЛЕННЫХ ОЗЕР

Юрий Александрович Федоров¹, Роман Геннадьевич Трубник²✉,
Дмитрий Николаевич Гарькуша³, Ирина Владимировна Доценко⁴

^{1, 2, 3, 4} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ fedorov@sfedu.ru

² truroman@sfedu.ru ✉

³ gardim1@yandex.ru

⁴ dotsenko@sfedu.ru

Аннотация. Представлены результаты натурных исследований донных отложений (пелоидов) гиперсоленых озер Белямин, Баскунчак, Эльтон и впадающей в него малой реки Сморогда. В них было произведено определение численности сульфитредуцирующих клостридий (СРК) и выполнен расчет перфрингенин-титра. Это позволило оценить санитарно-микробиологическое состояние донных осадков и возможность их применения для бальнеологических процедур. Оказалось, что в пробах отдельных слоев донных осадков озера Баскунчак и устья р. Сморогда, впадающей в озеро Эльтон, численность вегетативных клеток СРК не соответствует нормативным показателям для пелоидов. Для озера Баскунчак это может быть обусловлено спорадическим попаданием канализационных стоков из близко расположенных населенных пунктов Верхний Баскунчак, Средний Баскунчак и Нижний Баскунчак. Отметим также высокую вероятность участия сульфитредуцирующих клостридий, наряду с бактериями-сульфатредукторами, в генерации метана и сероводорода. Показана возможность использования данных по содержанию метана и численности СРК для оценки экологического состояния пелоидов.

Ключевые слова: солеродный бассейн, рапа, пелоиды, донные отложения, сульфитредуцирующие клостридии, соленость, метан, экологическое состояние, распределение

Для цитирования: Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В. Метан и сульфитредуцирующие клостридии как показатели экологического состояния пелоидов гиперсоленых озер // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 4. С. 105–117.

Благодарности: авторы благодарят с.н.с. лаборатории методов и технических средств анализа вод Гидрохимического института Н.С. Тамбиеву за определение содержания метана и суммарного сероводорода в донных отложениях, а также с.н.с. лаборатории санитарной микробиологии водных объектов и микробной экологии человека. Ростовского научно-исследовательского института микробиологии и паразитологии Роспотребнадзора к.б.н. М.А. Морозову за содействие при проведении отбора проб и их анализа. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00330, <https://rscf.ru/project/23-27-00330/>, в Южном федеральном университете.

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

Original article

METHANE AND SULFITE-REDUCING CLOSTRIDIA AS INDICATORS OF ECOLOGICAL STATE OF PELOIDS IN HYPERSALT LAKES

Yuri A. Fedorov¹, Roman G. Trubnik²✉, Dmitry N. Garkusha³, Irina V. Dotsenko⁴

^{1, 2, 3, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ fedorov@sfedu.ru

² truroman@sfedu.ru ✉

³ gardim1@yandex.ru

⁴ dotsenko@sfedu.ru

© Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В., 2024

Abstract. The results of field studies of bottom sediments (peloids) of the hypersaline lakes Belyamin, Baskunchak, Elton and flows into Elton the small Smorogda River are presented. The number of sulfite-reducing clostridia (SRC) in bottom sediments was determined and the perfringens titer was calculated. Based on the perfringens titer, the sanitary and microbiological state of bottom sediments was assessed for the possibility of their use for balneological procedures. Based on the perfringens titer, the possibility of using bottom sediments for balneological procedures was assessed. Research has shown that in samples of individual layers of bottom sediments of Lake Baskunchak and the mouth of the Smorogda River, which flows into Lake Elton, the number of vegetative cells of sulfite-reducing clostridia slightly exceeds the standard values for peloids. The ingress of sewage into the peloids of Lake Baskunchak may be due to the settlements of Verkhny Baskunchak, Sredniy Baskunchak and Nizhny Baskunchak located near the lake. Participation of sulfite-reducing clostridia, along with sulfate-reducing bacteria, in the generation of methane and hydrogen sulfide was noted. The possibility of using data on methane content and the amount of SRC to assess the ecological state of peloids is shown.

Keywords: salt basin, brine, peloids, bottom sediments, sulfite-reducing clostridia, salinity, methane, ecological state, distribution

For citation: Fedorov Yu.A., Trubnik R.G., Garkusha D.N., Dotsenko I.V. Methane and Sulfite-Reducing Clostridia as Indicators of Ecological State of Peloids in Hypersalt Lakes. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):105-117. (In Russ.).

Acknowledgments: the authors thank senior researcher of Laboratory of Methods and Technical Means for Water Analysis of the Hydrochemical Institute N.S. Tambieva for determining the content of methane and total hydrogen sulfide in bottom sediments, as well as senior researcher of Laboratory of Sanitary Microbiology of Water Bodies and Human Microbial Ecology of the Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology of Rospotrebnadzor Ph.D. M.A. Morozova for assistance in sampling and analysis. The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00330, <https://rscf.ru/project/23-27-00330/>, 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

К гиперсоленым озерам, по мнению [1], следует отнести водоемы, соленость которых превышает 35 г/дм³. Авторы рассматривают эти водные объекты как наиболее экстремальные места обитания на нашей планете. Мы считаем, что гиперсоленые водные объекты – это водоемы и водотоки с соленостью выше 50 г/дм³, поскольку, если следовать представлениям [1], например, Средиземное море со средней соленостью 38 г/дм³ должно быть отнесено к гиперсоленым. Другим аргументом в пользу предложенной границы минерализации является классификация О.А. Алекина [2], в которой выделены воды с морской соленостью (25–50 г/дм³) и рассолы (>50 г/дм³). Образующиеся в чашах исследуемых озер рассолы (рапа) и относятся к гиперсоленым.

Богатый природными достопримечательностями юг европейской территории России (ЕТР) славится не только минеральными водами, но и солеными озерами с сульфидными лечебными грязями [3–5]. Аридный климат и геологическое строение изучаемого региона обуславливают распространение многочисленных соленых озер, различных по физико-химическим условиям и степени минерализации рапы. Накопление солей в их водах происходит в результате как испарительного концентрирования в условиях засушливого климата, так и диффузионного переноса солей из подстилающих пород сарматского возраста, которые имеют в своем разрезе соленосные отложения и различные по химическому составу подземные воды. Для гиперсоленых озер также характерны значительные изменения химического состава и минерализации воды. Так, например, минерализация воды в оз. Большой Тамбукан [6] в связи с изменением климата и техногенным воздействием за более чем вековой период наблюдений изменялась от солоноватой до гиперсоленой. В гиперсоленых водоемах температурный диапазон, в котором вода остается жидкой и может существовать жизнь, шире, чем в пресных или морских. При минерализации 350 г/л этот диапазон составляет от –35 до +109 °С [1]. При этом многие гиперсоленые водоемы, несмотря на экстремальные условия среды и бытующее мнение об их стерильности по отношению к биоте, являются высокопродуктивными [1]. В них даже производится экстракция Beta-Carotene из рассолов, а также выращивание *Dunaliella* и *Artemia salina* с целью получения и переработки их биомассы и цист.

Гиперсолёные озера юга ЕТР часто являются вместилищем лечебной рапы и иловых сульфидных грязей, с помощью которых можно эффективно лечить целый спектр заболеваний: болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани, ревматоидный артрит, остеоартрит, оститы, периоститы, остаточные явления травм и интоксикаций центральной нервной системы, заболевания периферической нервной системы, шейно-лопаточный радикулит, невралгия межреберных нервов, пояснично-крестцовый радикулит и др. [7, 8]. Отметим, что пелоиды – это фактически те же донные отложения, но отличающиеся от них бальнеологическими свойствами [6].

Однако проблема использования лечебных грязей заключается в том, что среди части населения, которое посещает гиперсолёные озера юга ЕТР, широко распространено самостоятельное использование лечебных грязей «диким способом», непосредственно на озерах. Это представляется опасным, поскольку предварительно не очищенные лечебные грязи могут содержать множество условно-патогенных и патогенных микроорганизмов.

Яркими представителями крайне опасных для здоровья человека бактерий, которые могут сохраняться в лечебных грязях [3, 4, 9, 10], являются сульфитредуцирующие клостридии (СРК). Данная группа бактерий обладает уникальной способностью редуцировать сульфиты до сульфидов. Этот факт является отличительной чертой споровых анаэробов кишечного происхождения и учитывается при их идентификации. СРК примерно на 90 % представлены видом *C. perfringens* (от латинского *perfringo* – «потрясающий, прорывающий»). Он является возбудителем раневых инфекций и вызывает 3 типа поражений у человека с возможным летальным исходом – пищевые токсикоинфекции, некротический энтерит и газовую гангрену, а также известны случаи инфицирования СРК организма гидробионтов, ведущих придонный образ жизни, с раневой инфекцией [11].

Есть основания полагать, что наряду с метаногенами и сульфатредукторами *sensu stricto* СРК могут принимать непосредственное участие в образовании метана и сероводорода в донных отложениях водных экосистем, находящихся под антропогенным воздействием [10]. Еще одной особенностью СРК является их важная роль в оценке экологического состояния донных отложений, в том числе пелоидов.

Цель работы – исследовать особенности формирования CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ и сочетанного изменения численности СРК в пелоидах гиперсолёных озёр, а также оценить их экологическое состояние по содержанию метана и титру клостридий.

Материалы и методы

Карта-схема расположения станций отбора проб представлена на рис. 1, 2. Всего на трех озерах было отобрано 5 колонок донных отложений. Из них на озере Баскунчак были отобраны 2 колонки донных отложений (ст. № 4-1 и 4-2) (рис. 1, 2). Отбор, транспортировку, хранение проб проводили согласно аттестованной методике [12]. Пробы донных отложений вдали от берега отбирали с плавсредства трубкой конструкции ГОИН, а вблизи берега – с помощью специально сконструированной трубки из прозрачного оргстекла с остро заточенными краями и фторопластовым поршнем для выдавливания керна. Далее колонку донных отложений делили на слои: 0–2, 2–5, 5–10 см и т.д.

В пробах рапы определены рН, температура, минерализация, главные ионы HCO_3^- , CO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+\text{+K}^+$, концентрация метана. В донных отложениях определены концентрации суммарного сероводорода ($\Sigma\text{H}_2\text{S}$), метана, влажность и плотность, величины Eh и рН. Отбор, подготовка и химический анализ проб рассолов и донных отложений выполнены в соответствии с нижеприведенными методиками [12–14].

Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ проводили согласно аттестованным методикам, описанным в работе [15]. Определение метана выполняли на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Выполнение измерений массовой доли $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ основано на переводе сульфидов донных отложений в сероводород действием соляной кислоты, последующей отдувке сероводорода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и определении сульфид-ионов фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. При этом в общее содержание сульфидной серы входят как растворенные в поровой воде сероводород и сульфиды щелочных металлов, так и сульфиды, содержащиеся в твердой фракции, которые представляют собой кислоторастворимые сульфиды железа и тяжелых металлов, нерастворимые в воде. Опре-

деление газов производилось в донных отложениях при их естественной влажности и выражалось в мкг/г и мг/г влажного осадка (вл. о.) для метана и сероводорода соответственно. Определение величин Eh и pH выполнено с помощью электродов портативного pH-метра-ионмера «Экотест 2000» сразу после отбора проб.

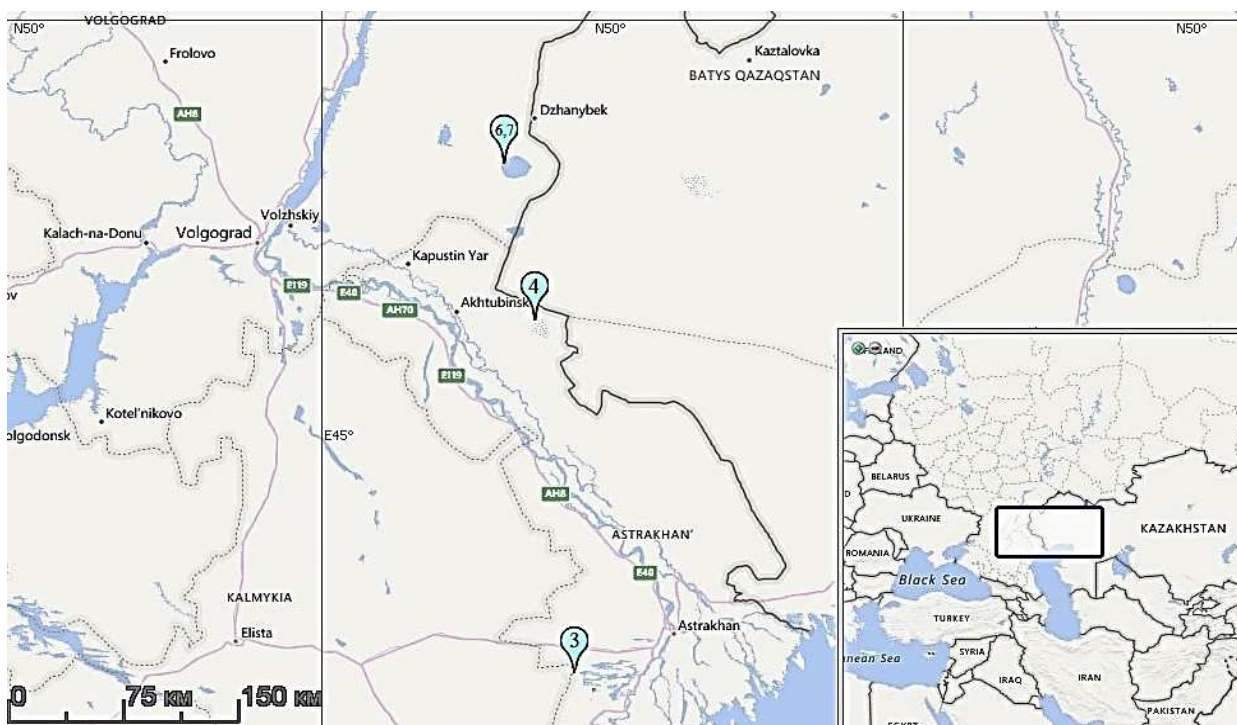


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб (3 – ильмень Беямин; 4 – озеро Баскунчак; 6 – озеро Эльтон; 7 – река Сморогда) / Fig. 1. Schematic map of the location of sampling stations (3 - Ilmen Belyamin; 4 - Lake Baskunchak; 6 - Lake Elton; 7 - Smorogda River)

В отобранных пробах послойно определяли численность СРК методом предельных разведений согласно методике [14]. СРК видов *C. perfringens*, *C. oedematiens*, *C. sporogenes*, *C. fallax*, *C. chauvoei* на среде Вильсона – Блера образуют интенсивно-черные колонии, так как в процессе роста СРК сернистокислый натрий восстанавливается с образованием сернистого железа [16]. Для подтверждения наличия СРК проводили микроскопию мазков, окрашенных по Граму согласно [17]: обнаружение грамположительных палочек указывало на присутствие СРК. Численность СРК выражали числом КОЕ (колониеобразующие единицы) в 1 г донных отложений для каждого опробованного слоя. Титр кластридий (перфрингенс-титр) рассчитывали по методике [18] для почв и пищевых продуктов: титр кластридий = 1/индекс, где титр кластридий – наименьшее весовое количество донных отложений, в котором содержится хотя бы одна жизнеспособная клетка СРК, г; индекс – количество КОЕ санитарно-показательного микроба (в нашем случае – СРК), обнаруженного в 1 г донных отложений (пелоидов).

Как описано в [19, 20], содержание CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ в донных отложениях может указывать на вероятность их органического загрязнения. При этом если донные отложения представлены пелоидами, то содержание метана в них рассматривается в качестве показателя органического загрязнения, а сероводорода – бальнеологических свойств лечебных грязей [20]. Однако не менее важным с биогеохимической точки зрения является то, что, как доказано в экспериментах и наблюдениях в природных условиях, СРК могут принимать участие в генерации обоих газов [10, 11] в донных отложениях как пресных, так и гиперсолёных водоемов.

В [21] представлена блок-схема типов распределения содержания метана в донных отложениях. Для каждого блока приведены вариации содержания метана в поверхностном (0–5 см) и подповерхностном (5–10 см) слоях донных отложений, по которым предлагается проводить оценку экологической обстановки. Ниже в соответствии с вышеизложенной методикой будут рассмотрены сочетанные во времени и пространстве вариации содержания метана и сероводорода в пелоидах гиперсолёных водных объектов.

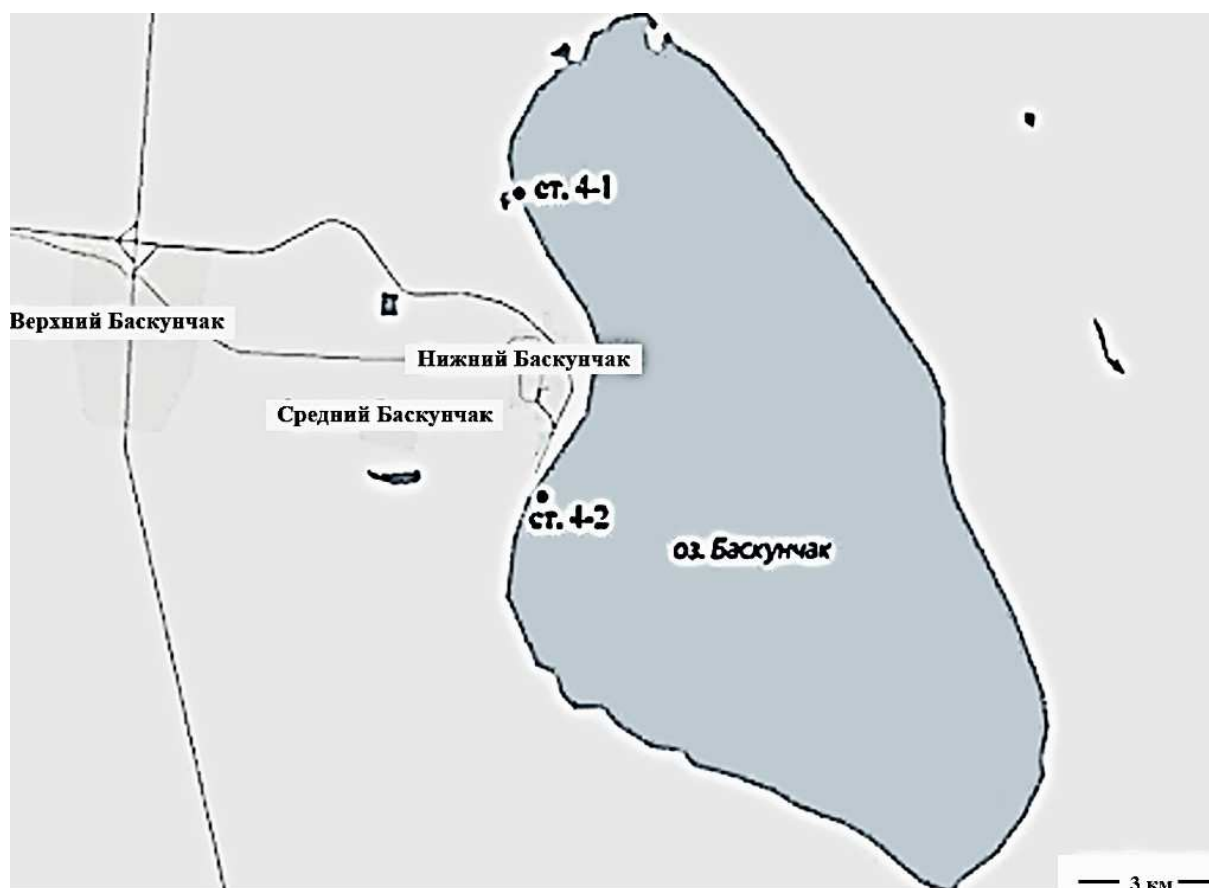


Рис. 2. Карта-схема района отбора проб в озере Баскунчак
/ Fig. 2. Schematic map of the sampling area in Lake Baskunchak

Результаты и обсуждение

Физико-химические свойства рассолов и пелоидов, вариации содержания в них метана CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$. Ильмень Беямин – солёное самосадочное озеро, расположенное в Наримановском районе Астраханской области, в 4 км на юго-восток от пос. Буруны, в 63 км от г. Астрахани и в 68 км к северу от Каспийского моря. Озеро относится к дельте Волги и входит в водную систему западных подстепных ильменей. Рассол и донные отложения отобраны по центру северной части ильмень Беямин [5] в 10 м от кромки воды (рапы) с глубиной в точке отбора до 0,15 м. На поверхности дна сверху находятся отложения галита мощностью 1–15 см. Далее следуют пелоиды черного цвета с запахом H_2S , маслянистые, вязко пластичные, с кристалликами соли песчаной размерности, горько-соленые, мощностью до 15–20 см, к низу постепенно светлеют и переходят в серый песчанистый влажный, рыхлый осадок без запаха H_2S .

Минерализация рапы ильменя Беямин в период исследования составляла 347,1 г/дм³ [5]. По классификации О.А. Алекина [2] рассол озера относится к хлоридному классу, третьему типу, группы магния и натрия ($\text{Cl}^{\text{Mg,Na}}_{\text{III}}$), температура рапы 23 °С. Обращает на себя внимание практически отсутствие иона HCO_3^- , Ca^{2+} и относительно незначительное содержание иона SO_4^{2-} . Это является следствием метаморфизации солевого состава вод озера в результате их испарения в аридном климате, роста минерализации, образования гипсов, карбонатов и процессов сульфатредукции. Коэффициент $\text{ЭNa}/\text{ЭСi}$ равен 0,78, что подтверждает классический путь галогенеза при испарении воды в замкнутых водоемах [22].

Основные физико-химические показатели исследованного (45 см) слоя отложений следующие: плотность – 1,7–2,25 г/см³ (1,9 г/см³), влажность 13,5–40,4 % (в среднем 27,6 %), реакция среды слабкокислая – нейтральная (рН 6,74–7,18, в среднем – 7,0), окислительно-восстановительный потенциал до глубины 40 см отрицательный, после чего он становится положительным (E_h –212,0 ... +11,5 мВ

(в среднем $-86,3$ мВ), что свидетельствует о преобладании в грязевой массе озера восстановительной обстановки, благоприятной для процессов сульфатредукции и накопления свободного сероводорода и сульфидов железа.

Содержание метана до глубины 45 см варьируется в диапазоне $0,59-3,13$ мкг/г вл. о. (в среднем $- 1,59$ мкг/г вл. о.). Его максимальное содержание обнаружено в интервале глубин 5,0–10 см, после чего имеет место волнообразное снижение содержания газа по профилю пелоидов (рис. 3).

Содержание $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, одного из важнейших, определяющих лечебные свойства грязей ингредиентов, изменяется в диапазоне $0,03-1,9$ (в среднем $- 0,5$ мг/г вл. о.), что характеризует её как слабосульфидную грязь. С глубиной погружения донных отложений наблюдается сначала плавный рост содержания CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ до глубины 10–20 см, а затем его существенное падение (рис. 4). Максимальное содержание метана располагается по глубине несколько выше относительно такового в случае с сероводородом, однако видна тенденция к локализации повышенных концентраций метана и сероводорода в донных отложениях до глубины 20 см с последующим снижением их содержания.

В соответствии с исследованиями [15] показано, что в высокоминерализованных грязевых озерах бактерии-метаногены и сульфатредукторы могут при наличии лабильного органического вещества занимать одни и те же экологические ниши. Это говорит в пользу того, что оба газа генетически связаны между собой и имеют, вероятнее всего, биогенное происхождение.



Рис. 3. Вертикальное распределение содержания метана в толще пелоидов исследованных водных объектов / Fig. 3. Vertical distribution of methane content in the thickness of peloids of the studied water bodies

Озеро Баскунчак – это бессточное самосадочное соленое озеро, расположенное в пределах Боткульско-Баскунчакской депрессии, входящей в состав Прикаспийской низменности, примерно в 270 км к северу от Каспийского моря, в 53 км к востоку от р. Волги и 50 км от г. Ахтубинска. Вблизи озера находятся посёлки Верхний Баскунчак, Средний Баскунчак и Нижний Баскунчак. Минерализация рапы в озере Баскунчак составляет $312,3$ г/дм³ [5]. Высокая минерализация рапы озера обусловлена превалированием процесса испарения в аридных условиях над поступлением осадков и речного стока. Химический состав рапы озера Баскунчак относится к хлоридному классу, третьему типу, группы магния, натрия ($\text{Cl}^{\text{Mg.Na}_{\text{III}}}$). В рассолах оз. Баскунчак наблюдается чрезвычайно низкое содержание ионов сульфатов и кальция. В то же время наблюдается заметное увеличение доли ионов магния. Это явление можно объяснить катионным обменом Na^+ раствора на Ca^{2+} и Mg^{2+} почв и пород.

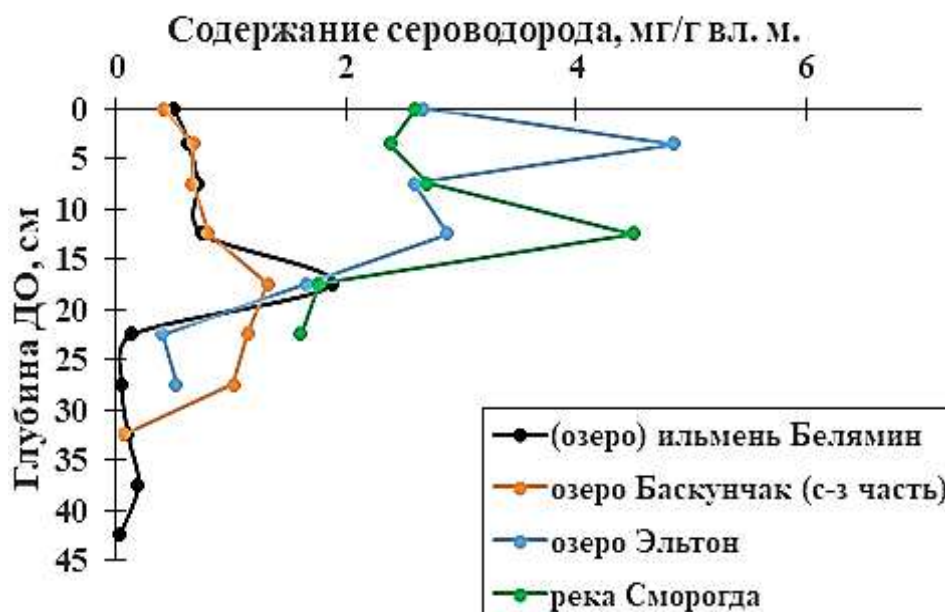


Рис. 4. Вертикальное распределение содержаний сульфидов в толще пелоидов исследованных водных объектов / Fig. 4. Vertical distribution of sulfide contents in the peloids of the studied water bodies

Частицы горных пород поступают в акваторию вследствие ветровой и водной эрозии. Ca^{2+} в результате катионного обмена и испарения молекул воды сначала накапливается, а затем, по мере достижения произведения растворимости его карбонатных и сульфатных солей, выпадает в осадок и кристаллизуется в виде карбонатов и гипса. Другая часть сульфатов подвергается в донных отложениях, как показано выше, редукции с образованием сульфидов. Плотность пелоидов в северо-западной части озера изменяется в диапазоне от 1,9 до 2,47 г/см³ (в среднем – 2,1 г/см³), влажность – от 13,5 до 40,4 % (средняя – 27,6 %), значения pH – от 6,6 до 6,9 (среднее – 6,7), значения Eh – от –269,8 до –121,4 мВ (в среднем –201 мВ).

Концентрация метана в рапе, отобранной непосредственно в оз. Баскунчак (ст. 4-1 и 4-2) на значительном удалении от ручья балки Улан-Благ и других источников подземных вод, а также в соленом водоеме, образуемом ручьем Динамитка, варьируется в пределах 0,47–2,85 мкл/дм³, в среднем составляя 1,53 мкл/дм³. Эти концентрации на 1–2 порядка ниже, чем в рапе исследованных дегазирующих подземных источников, разгружающихся в нижнем течении ручья балки Улан-Благ [23]. Содержание метана в пелоидах озера изменяется в диапазоне от 0,04 до 0,32 мкг/г (в среднем – 0,165 мкг/г). Его содержание в верхнем (0–5 см) и подповерхностном слое черных глинистых илов (5–10 см), отобранных в оз. Баскунчак (ст. 4-1) под 1 см коркой твердого крупнозернистого галита (рис. 5), было низким и варьировалось, соответственно, в диапазоне 0,04...0,1 мкг/г в.л. о. С глубины примерно 20 см отмечено слабое возрастание содержания метана (рис. 3). Сульфиды во влажных пелоидах содержатся в количестве от 0,06 до 1,32 мг/г (в среднем – 0,76 мг/г). Минимальное содержание S_2H_2 приходится на слой, залегающий на глубине 35 см (рис. 4).

Озеро Эльтон (рис. 1) – это солёное бессточное самосадочное озеро, располагающееся на севере Прикаспийской низменности в пределах Боткульско-Баскунчакской депрессии. Административно расположено на территории Эльтонского сельского поселения в Палласовском районе Волгоградской области, недалеко от границы с Казахстаном. В озеро Эльтон впадает несколько пресных ключей, множество пересыхающих ручьев и около 7 крупных рек с горько-соленой водой, из которых наиболее крупные расположены на севере – реки Хара, Ланцуг, на юге – реки Сморогда и Малая Сморогда (создан пруд) [5]. Поверхность озера покрыта похожими на чешую образованиями соляных минералов.

Минерализация воды в оз. Эльтон составляет 327,7 г/дм³. По химическому составу рассол относится к хлоридному классу, второму типу, группы магния, натрия ($\text{Cl}^{\text{Mg,Na}}_{\text{II}}$). Плотность пелоидов варьируется от 1,56 до 2,17 г/см³ (в среднем – 1,9 г/см³). Она не проявляет четкой законо-

мерности при изменении с глубиной. Влажность пелоидов изменяется от 20,2 до 35,5 % (в среднем – 28,0 %), уменьшаясь с глубины 10 см. Значения pH изменяются от 6,6 до 6,9 (в среднем – 6,7), а Eh – от –149,3 до –87,7 мВ (в среднем –131,4 мВ).

Содержание CH_4 в пелоидах озера Эльтон (рис. 3) изменялось в диапазоне от 1,39 до 6,03 мкг/г вл. о. (в среднем – 2,44 мкг/г вл. о.), а $\sum\text{H}_2\text{S}$ – от 0,4 до 4,86 (в среднем – 2,22 мг/г вл. о.). Наблюдается рост содержания метана с глубиной по разрезу толщи пелоидов. При этом своего максимума содержание метана достигает в интервале глубин 20–25 см. Наибольшее содержание $\sum\text{H}_2\text{S}$ приурочено к интервалу глубин 0–15 см, после чего имеет место его снижение (рис. 4).

Вода р. Сморогда по классификации О.А. Алекина [2] относится к речным водам с высокой минерализацией (6,88,0 г/дм³), хлоридному классу, второму типу, группы магния, натрия ($\text{Cl}^{\text{Mg,Na,II}}$). Гидрохимический коэффициент ЭNa/ЭСi равен 1,1, что указывает на образование ионов натрия и хлора путем растворения залежей каменной соли. В реку происходит разгрузка вод апшеронского водоносного горизонта и главным образом вод более глубоких горизонтов, размывающих древние пермские соляные отложения [24].

Плотность пелоидов варьируется в диапазоне от 1,51 до 2,25 г/см³ (в среднем – 1,95 г/см³). С глубиной погружения донных осадков она возрастает. Их влажность изменяется от 23,2 до 56,1 % (в среднем – 35,5 %). По разрезу она изменяется скачкообразно с тенденцией к снижению с глубиной. Значения pH варьируются от 7,21 до 7,75 (в среднем – 7,5), а Eh – от –269,8 до –121,4 мВ (в среднем –201 мВ). С глубиной значения pH не проявляют какой-либо тенденции. Что же касается величины Eh, то с глубины 10 см она снижается.

Содержание метана в воде р. Сморогда составляло 39,0–45,0 (в среднем – 42,0 мкл/дм³, в грунтовых водах (колодец) изменялось в диапазоне 0,25–0,29 мкл/дм³. В пелоидах водотока оно варьировалось в диапазоне 0,08–2,45 (в среднем – 1,3) мкг/г вл. о. В интервале глубин 0–5 и 5–10 см содержание метана колебалось от 0,12 до 1,57 мкг/г вл. о. Максимальные значения приурочены к интервалу глубин 10–15 см. Далее с глубиной оно несколько снижается (рис. 3). Суммарное содержание сульфидов изменялось в диапазоне от 1,61 до 4,5 мг/г вл. о. (в среднем – 2,59 мкг/г вл. о.), максимальное обнаружено в диапазоне глубин 10–15 см, после чего до глубины 25 см прослеживается их снижение (рис. 4).

Численность СРК в пелоидах. Результаты определения численности СРК в пелоидах (рис. 5) показывают, что на всех станциях отбора проб были обнаружены вегетативные клетки СРК, однако их численность варьировалась как по вертикали в пределах одной станции, так и между станциями.

Так, в пелоидах ильменя Белямин была отмечена крайне низкая численность СРК (не более 70 КОЕ/г, среднее значение – около 21 КОЕ/г), как и в случае с пелоидами оз. Эльтон (не более 80 КОЕ/г, среднее значение – около 13 КОЕ/г). Численность СРК в пелоидах оз. Баскунчак не превышает 200 КОЕ/г (среднее значение – около 90 КОЕ/г). Совсем иная ситуация складывается в пелоидах реки Сморогда, которая впадает в оз. Эльтон. Здесь численность СРК варьирует от 1 до 20 тыс. КОЕ/г, что сразу на несколько порядков больше, чем в пелоидах других исследованных озер. Вертикальное распределение СРК в толще пелоидов имеет отчетливую тенденцию к уменьшению численности СРК с глубиной (рис. 6). При этом пики численности приходятся на слой пелоидов 5–10 см в случае с озером Эльтон; на слой 5–15 см – в пелоидах оз. Баскунчак; на слой 0–2 см – в пелоидах озера Белямин.

В Российской Федерации при исследовании качества лечебных грязей всех типов (торфяные, сапропелевые, иловые минеральные, сопочные) приняты нормативные уровни ряда важных показателей, в том числе численности СРК, согласно которым титр клостридий должен составлять не менее 0,1 [25]. Это достаточно жесткий норматив, поскольку при его соблюдении подразумевается, что исследованные пелоиды готовы к применению для аппликаций без дополнительной очистки, по крайней мере по титру клостридий. Между тем существуют Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы [26], в которых предложены нормативные значения титра клостридий для почвенного покрова. Очевидно, что почва и донные отложения не идентичны по своим литологическим и физико-химическим свойствам и условиям, однако донные отложения, особенно относительно небольших по площади водных объектов, а также вблизи от уреза воды/береговой линии, чаще всего так или иначе включают в себя смытые почвы, которые, попадая в водную толщу, осаждаются, претерпевая изменения в ходе диагенеза, составляют неотъемлемую часть донных отложений. Исходя из этого, мы считаем правомерным

оценить санитарно-микробиологическое состояние пелоидов по титру кластридий согласно следующим критериям: если титр кластридий составляет 0,01 и выше – донные отложения относятся к категории «чистые», при 0,009–0,0001 – к категории «загрязненные», при 0,00009 и ниже – к категории «сильно загрязненные».

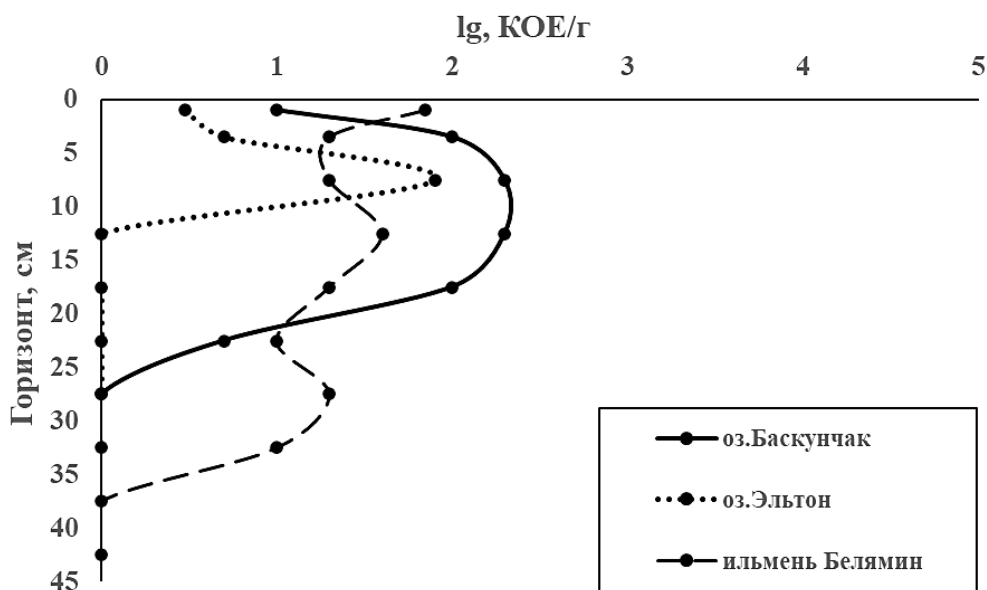


Рис. 5. Вертикальное распределение численности СПК в пелоидах исследованных высокоминерализованных озер / Fig. 5. Vertical distribution of the number of SRC in the pelodia of the studied highly mineralized lakes

Таким образом, по санитарно-микробиологическому состоянию пелоиды оз. Белямин и Эльтон по титру кластридий можно отнести к категории «чистые», как и пелоиды оз. Баскунчак, поскольку в большинстве слоев пелоидов титр кластридий был не ниже 0,01. Пелоиды р. Сморогда характеризуются как «загрязненные», так как во всех слоях пелоидов титр кластридий был 0,001 и ниже. Причиной могло быть непродолжительное воздействие на экосистему р. Сморогда канализационных стоков, которые поступали в акваторию оз. Эльтон. При смешении вод реки с водами озера произошло самоочищение от, возможно, поступивших в водоем канализационных стоков, которое способствовало снижению численности СПК. Вероятно, само их присутствие служит индикатором антропогенного воздействия на экосистему озера.

В донных отложениях озера Баскунчак на обеих станциях в интервале глубин 0–20 см наблюдалась численность от 10 до 200 КОЕ/г, а титр кластридий – от 0,01 до 0,005. Это дает основание отнести по санитарно-микробиологическому состоянию отдельные слои донных отложений на двух станциях отбора проб в оз. Баскунчак к категории от условно «чистых» до «загрязненных».

Зарегистрированные минимальные значения перфрингенс-титра в оз. Баскунчак и р. Сморогда приурочены к интервалу глубин 5–10 см. С глубиной погружения донных осадков в этих водных объектах наблюдается тенденция к росту перфрингенс-титра, что указывает на снижение в этом же направлении антропогенного влияния (рис. 6).

Как показано выше, минерализация рапы в гиперсолёных озерах в период исследования составляла от 149,9 до 347,1 г/дм³. Гипотетически это обстоятельство могло бы обусловить относительно невысокую численность СПК в пелоидах исследованных озер. Однако анализ данных [27, 28] показывает, что при указанном выше уровне минерализации численность СПК может достигать 100 тыс. КОЕ/г. Это свидетельствует о том, что высокое содержание солей не является лимитирующим фактором для жизнедеятельности СПК в рапе и пелоидах высокоминерализованных озер. Учитывая, что численность СПК, выраженная в титре кластридий, является ключевым показателем в оценке санитарно-микробиологического состояния донных отложений (пелоидов) гиперсолёных озер, можно с высокой вероятностью отнести их к категории условно «чистые». Вместе с тем по санитарно-микробиологическому состоянию пелоиды в районе впадения р. Сморогда в оз. Эльтон по титру кластридий следует отнести к категории «загрязненные».

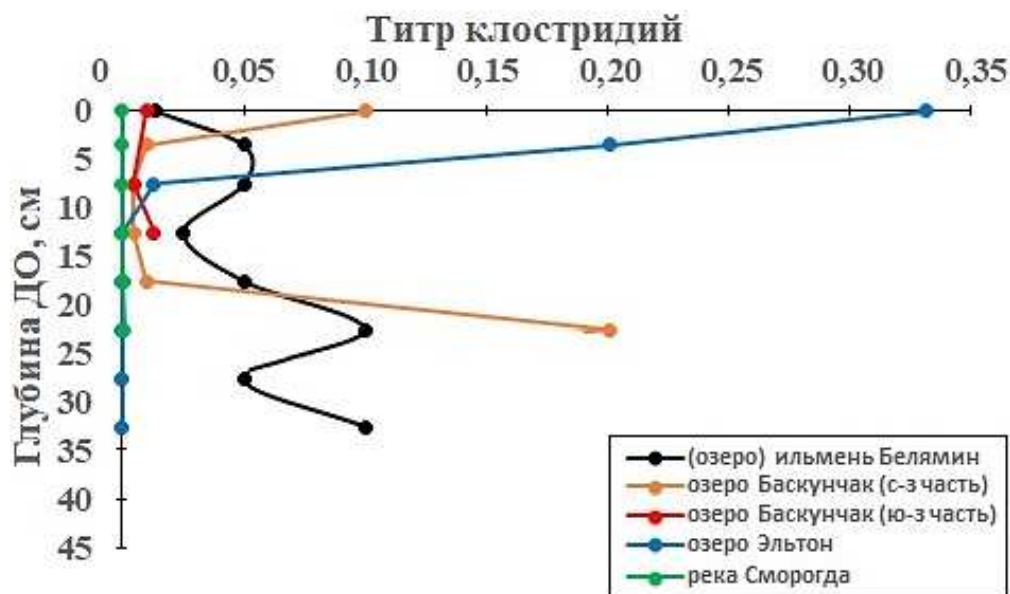


Рис. 6. Вертикальное распределение титра клостридий в толще пелоидов исследований водных объектов / Fig. 6. Vertical distribution of clostridia titer in the thickness of peloids from studies of water bodies

На основании полученных данных и подхода, предложенного в работе [27], мы можем оценить экологическое состояние пелоидов исследованных водных объектов по двум показателям – содержание метана и численность СРК. Результаты оценки показали, что экологическое состояние пелоидов оз. Баскунчак характеризуется как благополучное, в то время как экологическое состояние пелоидов озер Беямин, Эльтон и р. Сморогда оценивается как удовлетворительное. Таким образом, рекомендуется проведение дополнительных исследований, направленных на установление источников и масштабов антропогенного воздействия на водные объекты.

Заключение

1. По величине минерализации воды изученные водные объекты отнесены к гиперсолёным.
2. Высокое содержание солей не является лимитирующим фактором для жизнедеятельности бактерий метаногенов, сульфатредукторов и СРК в рапе и пелоидах гиперсолёных озер.
3. Распределение содержания CH_4 по разрезам пелоидов гиперсолёных водных объектов не проявляет до глубины 45 см тенденции к снижению с глубиной. Для этого же интервала глубин содержание $\sum \text{H}_2\text{S}$ имеет отчетливую тенденцию к снижению по мере их роста.
4. Вертикальное распределение СРК в толще пелоидов имеет отчетливую тенденцию к уменьшению численности СРК с глубиной, а титра клостридий – к росту его значений вниз по профилю донных отложений.
5. По санитарно-микробиологическому состоянию пелоиды исследованных гиперсолёных озер по титру клостридий отнесены к категории условно «чистые», а пелоиды р. Сморогда – «загрязненные».
6. Все исследованные пелоиды на участках отбора проб, согласно данным по титру клостридий, не могут быть безопасно использованы без предварительной очистки для аппликаций в ходе бальнеологических процедур.
7. Экологическое состояние пелоидов озера Баскунчак характеризуется как благополучное, в то время как экологическое состояние пелоидов озер Беямин, Эльтон и р. Сморогда оценивается как удовлетворительное.

Список источников

1. Шадрин Н.В., Ануфриева Е.В. Экосистемы гиперсолёных водоемов: структура и трофические связи // Журн. общ. биологии. 2018. Т. 79, № 6. С. 418–427.
2. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 444 с.

3. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G. Bacteria of the Clostridium Genus, Methane and Hydrogen Sulfide in Sulfide Mud of the Taman Peninsula Reservoirs // OnLine J. of Biological Sciences. 2018. Vol. 18 (3). P. 315–322.
4. Мальчуковский Л.Б., Старокожко Л.Е., Гайдамака И.И., Чинизубов А.И. Сравнительная характеристика иловой сульфидной грязи озёр Большой Тамбукан и Солёное Лушниковского месторождения // Курортная медицина. 2012. № 1. С. 14–21.
5. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Талта Б.В., Трубник Р.Г. Эколого-гидрохимическая характеристика высокоминерализованных озёр Астраханской и Волгоградской областей по результатам экспедиционных исследований 2019 г. // Современные проблемы географии: межвуз. сб. науч. тр. Астрахань: Астраханский гос. ун-т, 2019. Вып. 4. С. 6–31.
6. Федоров Ю.А. Гидролого-гидрохимические исследования сульфидного озера Большой Тамбукан // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2013. № 2. С. 81–88.
7. Старокожко Л.Е., Школьный В.Н. Сравнительная характеристика физико-химического состава и санитарно-микробиологического состояния иловых сульфидных грязей материкового и морского происхождения // Курортная медицина. 2016. № 1. С. 22–26.
8. Холопов А.П., Шашель В.А., Перов Ю.М., Настенко В.П. Грязелечение. Краснодар: Периодика Кубани, 2003. 283 с.
9. La Sala L.F., Redondo L.M., Díaz Carrasco J.M., Pereyra A.M., Farber M., Jost H., Fernández-Miyakawa M.E. Carriage of Clostridium perfringens by benthic crabs in a sewage-polluted estuary // Marine Pollution Bulletin. 2015. Vol. 97. P. 365–372.
10. Fedorov Y.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G., Morozova M.A. Sulfite-Reducing Clostridia and their Participation in Methane and Hydrogen Sulfide Formation in the Bottom Sediments of Water Objects and Streams of the ETR South // Water Resources. 2019. Vol. 46 (1). P. 85–93.
11. Fedorov Yu.A., Morozova M.A., Trubnik R.G. Clostridia in Commercial Fish of the Azov and Black Seas and in Aquaculture Facilities in the Southern Region of Russia // OnLine J. of Biological Sciences. 2019. Vol. 19 (1). P. 37–45.
12. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, Росгидромет, 2013. 19 с.
13. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. Л.В. Боевой. Ростов н/Д.: НОК, 2009. Ч. 1. 1045 с.
14. Руководство по медицинской микробиологии. Общая и санитарная микробиология / под ред. А.С. Лабинской, Е. Г. Волиной. М.: Бином, 2008. 1080 с.
15. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов н/Д.; М.: Ростиздат, 2007. 329 с.
16. ГОСТ 10444.9-88. Продукты пищевые. Метод определения Clostridium perfringens. М.: Стандарт информ, 2010.
17. ГОСТ 29185-2014 (ISO 15213:2003). Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета сульфитредуцирующих бактерий, растущих в анаэробных условиях. М.: Стандарт информ, 2015.
18. Инешина Е.Г., Гомбоева С.В. Методические указания к лабораторному практикуму по курсам «Санитарная микробиология», «Санитарно-микробиологический контроль на производстве», КПВ «Микробиология» для студентов специальностей 240901, 280201, 260100, 260301, 260303, 260201, 260202, 260504, 260501, 080401, 200503. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2006. 90 с.
19. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G. Methane and hydrogen sulfide in bottom sediments of small rivers and reservoirs of the Eastern Donbass // 17th Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2017, Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings (Albena, Bulgaria, 27.06.2017–06.07.2017). Albena, Bulgaria, 2017. Iss. 51, vol. 17. P. 659–666. Doi: 10.5593/sgem2017/51/S20.129.
20. Trubnik R.G., Fedorov Yu.A., Nedoseka L.A. Recovered gases and bacteria from the Clostridium genus as ecological condition indicators of bottom sediments of the Eastern Donbass small rivers // OnLine J. of Biological Sciences. 2017. Vol. 17 (3). P. 201–210.
21. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Метан как индикатор условий раннего диагенеза и экологического состояния водных экосистем // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2013. № 6. С. 78–82.
22. Никаноров А.М., Тарасов М.Г., Федоров Ю.А. Гидрохимия и формирование подземных вод и рассолов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 243 с.
23. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Талта Б.В., Ковалев Е.А. Концентрация и эмиссия метана и сероводорода в озере Баскунчак, ручье балки Улан-Благ и дегазирующих источниках подземных вод в весенний период // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 3. С. 80–92.

24. Мязина Н.Г. Сопоставление гидрогеохимических особенностей озера Эльтон и Мертвого моря // Водное хозяйство России. 2013. № 1. С. 52–59.

25. МУ 143-9/316-17. Методические указания по санитарно-микробиологическому анализу лечебных грязей. М., 1989.

26. Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы (утв. Минздравом СССР 04.08.1976 № 1446-76) (с изм. от 07.02.1999). М., 1976.

27. Трубник Р.Г. Восстановленные газы и сульфитредуцирующие клостридии как показатели экологического состояния донных отложений // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2023. Т. 2. С. 155–160.

28. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Трубник Р.Г., Талпа Б.В. Гидрохимия группы соленых озер Ставропольского края // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 4. С. 100–106.

References

1. Shadrin N.V., Anufrieva E.V. Ecosystems of hypersalted reservoirs: structure and trophic connections. *Zhurn. obshch. biologii = Journal of General Biology*. 2018;79(6):418-427. (In Russ.).
2. Alekin O.A. *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1970. 444 p. (In Russ.).
3. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G. Bacteria of the Clostridium Genus, Methane and Hydrogen Sulfide in Sulfide Mud of the Taman Peninsula Reservoirs. *OnLine J. of Biological Sciences*. 2018;18(3):315-322.
4. Malchukovsky L.B., Starokozhko L.E., Gaydamaka I.I., Chipizubov A.I. Comparative characteristics of silt sulfide mud of lakes Bolshoy Tambukan and Saline Lushnikovskoye deposits. *Kurortnaya meditsina = Resort Medicine*. 2012;(1):14-21. (In Russ.).
5. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Talpa B.V., Trubnik R.G. Ecological and hydrochemical characteristics of highly mineralized lakes of the Astrakhan and Volgograd regions according to the results of expeditionary research in 2019. *Modern problems of geography: interuniversity collection of scientific articles*. Astrakhan: Astrakhan State University Press; 2019;(4):6-31. (In Russ.).
6. Fedorov Yu.A. Hydrological and hydrochemical studies of the sulfide lake Bolshoy Tambukan. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2013;(2):81-88. (In Russ.).
7. Starokozhko L.E., Shkolny V.N. Comparative characteristics of the physico-chemical composition and sanitary-microbiological state of silt sulfide mud of continental and marine origin. *Kurortnaya meditsina = Resort Medicine*. 2016;(1):22-26. (In Russ.).
8. Kholopov A.P., Shashel V.A., Perov Yu.M., Nastenkov V.P. *Mud treatment*. Krasnodar: Periodika Kubani Publ.; 2003. 283 p. (In Russ.).
9. La Sala L.F., Redondo L.M., Díaz Carrasco J.M., Pereyra A.M., Farber M., Jost H., Fernández-Miyakawa M.E. Carriage of Clostridium perfringens by benthic crabs in a sewage-polluted estuary. *Marine Pollution Bulletin*. 2015;97:365-372.
10. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G., Morozova M.A. Sulfite-Reducing Clostridia and their Participation in Methane and Hydrogen Sulfide Formation in the Bottom Sediments of Water Objects and Streams of the ETR South. *Water Resources*. 2019;46(1):85-93.
11. Fedorov Yu.A., Morozova M.A., Trubnik R.G. Clostridia in Commercial Fish of the Azov and Black Seas and in Aquaculture Facilities in the Southern Region of Russia. *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2019;19(1):37-45.
12. RD 52.24.511-2013. *The mass fraction of methane in bottom sediments. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute, Roshdromet Press; 2013. 19 p. (In Russ.).
13. Boeva L.V., ed. *Guidelines for the chemical analysis of land surface waters*. Rostov-on-Don: NOK Publ.; 2009. Ch. 1. 1045 p. (In Russ.).
14. Labinskaya A.S., Volina E.G., eds. *Guidelines for Medical Microbiology. General and sanitary microbiology*. Moscow: Binom Publ.; 2008. 1080 p. (In Russ.).
15. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Methane in aquatic ecosystems*. Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ.; 2007. 329 p. (In Russ.).
16. GOST 10444.9-88. *Food products. Method of determination of Clostridium perfringens*. Moscow: Standart inform Publ.; 2010. (In Russ.).
17. GOST 29185-2014 (ISO 15213:2003). *Microbiology of food and animal feed. Methods for detecting and counting sulfite-reducing bacteria growing under anaerobic conditions*. Moscow: Standart inform Publ.; 2015. (In Russ.).
18. Ineshina E.G., Gomboeva S.V. *Methodological guidelines for laboratory practice in the courses "Sanitary microbiology", "Sanitary and microbiological control at work", KPV "Microbiology" for students of specialties*

240901, 280201, 260100, 260301, 260303, 260201, 260202, 260504, 260501, 080401, 200503. Ulan-Ude: East Siberian State University of Technology and Management Press; 2006. 90 p. (In Russ.).

19. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G. Methane and hydrogen sulfide in bottom sediments of small rivers and reservoirs of the Eastern Donbass. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2017, Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings* (Albena, Bulgaria, 27.06.2017-06.07.2017). Albena, Bulgaria, 2017;17(51):659-666, doi: 10.5593/sgem2017/51/S20.129.

20. Trubnik R.G., Fedorov Yu.A., Nedoseka L.A. Recovered gases and bacteria from the Clostridium genus as ecological condition indicators of bottom sediments of the Eastern Donbass small rivers. *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2017;17(3):201-210.

21. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Methane as an indicator of the conditions of early diagenesis and the ecological state of aquatic ecosystems. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2013;(6):78-82. (In Russ.).

22. Nikanorov A.M., Tarasov M.G., Fedorov Yu.A. *Hydrochemistry and formation of groundwater and brines*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1983. 243 p. (In Russ.).

23. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Trubnik R.G., Talpa B.V., Kovalev E.A. Concentration and emission of methane and hydrogen sulfide in Lake Baskunchak, stream of the beam of Ulan-Blag and degassing groundwater sources in the spring period. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(3):80-92. (In Russ.).

24. Myazina N.G. Comparison of hydrogeochemical features of Lake Elton and the Dead Sea. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Management of Russia*. 2013;(1):52-59. (In Russ.).

25. *MU 143-9/316-17. Methodological guidelines for sanitary and microbiological analysis of therapeutic mud*. Moscow, 1989. (In Russ.).

26. *Methodological guidelines for sanitary and microbiological soil research (approved by the Ministry of Health of the USSR 04.08.1976 No. 1446-76) (with amendments dated 07.02.1999)*. Moscow, 1976. (In Russ.).

27. Trubnik R.G. Reduced gases and sulfite-reducing clostridium as indicators of the ecological state of bottom sediments. *Water resources in conditions of global challenges: environmental problems, management, monitoring: collection of works of the All-Russian Scientific and Practical conference with the International participation*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2023;2:155-160. (In Russ.).

28. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G., Talpa B.V. Hydrochemistry of the salt lakes group of the Stavropol Territory. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2018;(4):100-106. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю.А. Федоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Р.Г. Трубник – научный сотрудник, Институт наук о Земле.

Д.Н. Гарькуша – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

И.В. Доценко – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Information about the authors

Yu.A. Fedorov - Doctor of Science (Geography), Professor, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

R.G. Trubnik - Researcher, Institute of Earth Sciences.

D.N. Garkusha - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

I.V. Dotsenko - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 25.11.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 10.11.2023; approved after reviewing 25.11.2023; accepted for publication 19.02.2024.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 597.556.331.1:574.32

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-118-125

К ИЗУЧЕНИЮ БИОЛОГИИ СУДАКА (*SANDER LUCIOPERCA*) В ИЗМЕНИВШИХСЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ АГРАХАНСКОГО ЗАЛИВА КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Руслан Магомедович Бархалов ^{1✉}, Джавгарат Магомедовна Рамазанова ²,
Марина Владимировна Хлопкова ³, Магомед Курбанович Мирзаханов ⁴

^{1,3} Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ Государственный природный биосферный заповедник «Дагестанский», Махачкала, Республика Дагестан, Россия

² Прикаспийский зональный научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал Федерального аграрного научного центра РД, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

⁴ Дагестанский государственный университет, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ barkhalov.ruslan@yandex.ru✉

² ramazanovadm@mail.ru

³ hlopkovam@mail.ru

⁴ mirzaxanov79@bk.ru

Аннотация. Северная часть Аграханского залива, которая раньше играла своеобразную роль приемного водоема для мигрирующих на нерест и зимовку проходных и полупроходных рыб и служила питомником для развития личинок их молоди, скатывающихся сюда из нерестово-выростных водоемов и низовий Терека, в последние годы в результате критического снижения стока реки и падения уровня Каспийского моря перестала выполнять свои главные функции по увеличению рыбных запасов в Терско-Каспийском рыбохозяйственном районе. Среди полупроходных рыб особо важное рыбохозяйственное значение имеет судак как самый крупный и наиболее ценный в промысловом и пищевом отношении представитель семейства Percidae. Установлено, что популяция судака в северной части Аграханского залива в последние годы (2018–2021 гг.) оказалась в наибольшей степени подверженной неучтенному изъятию и численность ее находится в депрессивном состоянии. Выявлено, что современный уровень воспроизводства судака в заливе оказался сравнительно ниже в результате интенсивной зарастаемости и слабой обводняемости нерестилищ. Гистологическое изучение половых желез показало, что яичники судака в IV стадии зрелости находятся в течение пяти месяцев – с конца октября по апрель. Установлено, что темп роста на разных этапах развития зависит от факторов внешней среды (гидролого-гидрохимический и температурный режим водоема, солевой баланс и др.), а также обеспеченности их пищей.

Ключевые слова: Аграханский залив, судак, плодовитость, длина, масса, возраст, коэффициент упитанности, структура популяции

Для цитирования: Бархалов Р.М., Рамазанова Д.М., Хлопкова М.В., Мирзаханов М.К. К изучению биологии судака (*Sander lucioperca*) в изменившихся экологических условиях северной части Аграханского залива Каспийского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 118–125.

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

Original article

THE STUDY THE BIOLOGY OF WALLEYE (*SANDER LUCIOPERCA*) IN THE CHANGED ECOLOGICAL CONDITIONS OF THE NORTHERN PART OF THE AGRAKHAN BAY OF THE CASPIAN SEA

Ruslan M. Barkhalov^{1✉}, Dzhavgarat M. Ramazanova², Marina V. Khlopkova³,
Magomed K. Mirzakhanov⁴

^{1, 3} Precaspian Institute of Biological Resources of the Dagestan Federal Research Centre of the RAS,
Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

^{1, 2} Dagestan State Nature Biosphere Reserve, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

³ Caspian Regional Research Veterinary Institute - Branch of the Federal Agrarian Research Center
of the Republic of Dagestan, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

⁴ Dagestan State University, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

¹ barkhalov.ruslan@yandex.ru✉

² ramazanovadm@mail.ru

³ hlopkovam@mail.ru

⁴ mirzaxanov79@bk.ru

Abstract. The northern part of the Agrakhan Bay, which used to play a peculiar role of a receiving reservoir for migratory and semi-migratory fish migrating to spawn and wintering, and served as a kind of nursery for the development of larvae of their young, rolling here from spawning-growing reservoirs and the lower reaches of the Terek, in recent years, as a result of a critical decrease in river flow and a drop in the level of the Caspian. It has ceased to perform its main functions to increase fish stocks in the Terek-Caspian fisheries area. Among semi-migratory fish, the walleye is of particularly important fishery importance, as the largest and most valuable representative of the Percidae family in commercial and food relations. It was found that the structure of the walleye population in the northern part of the Agrakhan Bay in the last 2018-2021 turned out to be the most susceptible to unaccounted withdrawal, and its number is in a depressed state. It was revealed that the current level of reproduction of walleye in the bay turned out to be relatively lower as a result of intensive overgrowth and weak water availability. Histological examination of the gonads showed that the ovaries of walleye in the IV stage of maturity are, for five months, from the end of October to April. It is established that the growth rate at different stages of development depends on environmental factors (hydro-hydrochemical and temperature regime of reservoirs, regime, salt balance, etc.) as well as their food supply

Keywords: Agrakhan Bay, walleye, fertility, length, weight, age, fatness coefficient, population structure

For citation: Barkhalov R.M., Ramazanova D.M., Khlopkova M.V., Mirzakhanov M.K. The Study the Biology of Walleye (*Sander Lucioperca*) in the Changed Ecological Conditions of the Northern Part of the Agrakhan Bay of the Caspian Sea. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):118-125. (In Russ.).

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

Введение

До открытия Прорези (до 1977 г.) в Аграханском полуострове терские воды заполняли весь Аграханский залив и опресняли предустьевую зону Каспийского моря к северу и северо-востоку от залива. Это был огромный естественный коллектор, смягчающий переход производителей и скатывающейся молоди рыб из одной среды обитания в другую (буферная, адаптационная зона) при их прохождении из моря в реки и внутренние нерестово-выростные водоемы и при скате производителей после нереста в осолоненную зону Каспия; место нереста ценных видов рыб и место их нагула; место, где скатывающаяся молодь нагуливалась до жизнестойкого состояния; самый удобный участок Каспийского моря для зимнего залегания рыб [1–5].

В последние годы (2018–2022 гг.) в северной части Аграханского залива наблюдается ухудшение гидрологического режима и зависимое от сгонно-нагонных ветров периодическое

заилие Кубякинского банка, что, в свою очередь, отрицательно отразилось на количественном и качественном составе ихтиофауны. В настоящее время численность популяции сома, щуки, кутума и особенно судака существенно сократилась, а сами популяции оказались в депрессивном состоянии. Изменения экологических условий заметно отразились на биологических особенностях этих видов. Так, по сравнению с 1990-ми гг. изменились сроки начала нереста и продолжительность периода икрометания (увеличился диапазон колебаний), а также сократились площади нерестовых угодий (более 70 % площади нерестилищ осушились и стали использоваться как пастбищные участки для сельскохозяйственных животных) [3, 4].

Судак (*Sander lucioperca*) – важная промысловая полупроходная рыба, которая наряду с высокими пищевыми и особенно диетическими качествами является и ценным биомелиоратором, освобождающим водоем от малоценной и сорной рыбы, что при современной тенденции перевода большинства водоемов в товарные хозяйства имеет важное значение в рыбной отрасли. Ареал обитания судака в Терско-Каспийском рыбохозяйственном районе довольно широк, относительно большие концентрации особей наблюдаются возле о. Чечень, в северной части Аграханского залива и в дельте Терека, где прослеживается незначительное накопление старших возрастных категорий.

Цель исследования – в экологически изменившихся условиях северной части Аграханского залива изучить состояние биологических показателей судака как наиболее ценного представителя семейства Percidae.

Материал и методы исследований

Изучение качественной структуры популяций судака проводили по результатам обследования научно-исследовательских и контрольных уловов с марта по ноябрь 2018–2021 гг. Контрольный вылов судака осуществляли с использованием ставных сетей с ячейей 36–60 мм. Собранный ихтиологический материал подвергали полному биологическому анализу по общепринятым ихтиологическим методикам [6–9]. Линейный и весовой рост судака определяли с помощью уравнения роста степенного типа И.И. Шмальгаузена [6]. Для характеристики сезонных циклических изменений в гонадах рыб брали их пробы на гистологическое изучение согласно методике [7, 8]. На свежем материале определяли также плодовитость [8] и возраст рыбы [9]. Всего в период исследования собрано и обработано 445 экземпляров судака.

Результаты исследований

Судак как ценный вид имеет важное промысловое значение. Высокие уловы судака на дагестанском побережье Каспийского моря наблюдались в 1930–1940 гг. и составляли 1,5–1,7 тыс. т. В последние 6 лет (2017–2022 гг.), по отчетным данным Северо-Кавказского территориального управления Росрыболовства, уловы судака на дагестанском побережье Каспийского моря находятся на крайне низком уровне и колеблются от 53,7 (2021 г.) до 138,1 т (2019 г.). По-видимому, это связано с понижением уровня моря и одновременным сокращением нерестовых площадей, а также с ухудшением экологических условий среды обитания рыб.

Как известно, судак обитает преимущественно в проточных водоемах, хорошо насыщенных кислородом. В северной части Аграханского залива такие участки находятся в районе Поповой косы и Прорези, где имеются благоприятные экологические условия для естественного воспроизводства судака. Поэтому около 80 % производителей от всей популяции судака мигрируют на нерест именно в указанные районы [2, 10]. В 2020–2021 гг. нерестовая миграция судака наблюдалась в конце марта при температуре воды +9–10 °С, а начало нереста – в первых числах апреля при температуре 11–12,5 °С. Нерест в изучаемый период продолжался до середины мая (15,7–17,8 °С), при этом массовых нерестовых скоплений, как это отмечалось для сазана, леща, воблы и других рыб, у судака не наблюдалось. Икру судак откладывал в специально построенные гнезда на хорошо промытых корешках высших водных растений (камыш, кувшинка, рогоз, кубышка) на глубине 55–220 см. В современный период уровень воспроизводства судака в заливе оказался сравнительно ниже, что обусловлено ухудшением гидролого-гидрохимического режима в сроки нерестовых миграций, нереста и инкубации икры, а также уменьшением количества участвующих в нересте производителей.

Гистологическое изучение половых желез показало, что в начале июня яичники судака находились во II стадии зрелости, на срезах яйценозные пластинки были незаметны, основная масса ооцитов находилась в фазе однослойного фолликула С. По-видимому, II стадия зрелости у судака терско-каспийского стада длится до середины августа, так как в конце августа и в начале сентября на гистологических срезах яичников уже были видны ооциты в III стадии зрелости – начала вакуолизации, т.е. ооциты находились в фазе первоначального накопления желтка D₁, которая, очевидно, длится 1,5–2 месяца (до конца октября). Исследование ноябрьских гистологических срезов (5–9 ноября 2021 г.) показало, что в ооцитах на разных стадиях отмечается процесс накопления желтка (фаза D₂–D₃), а также их наполнения желтком и жиром (фаза E), что характерно для IV стадии зрелости яичников. Исследования показали, что главным фактором начала интенсивного вителлогенеза является температура воды, так как процесс накопления жира и желтка в яичниках прослеживался в течение осени и зимы при температуре воды не выше +13 °С. В последних числах марта большинство самок находилось уже в текучем состоянии (V стадия зрелости), некоторые текучие особи встречались и в течение апреля, хотя в апреле попадались как уже отнерестившиеся особи (VI стадия зрелости), так и самки еще в преднерестовом состоянии (IV стадия зрелости). В этот период исследование гистологических срезов яичников показало, что основная часть ооцитов находится в фазе дефинитивного размера F, а небольшая часть – еще в фазе наполненного желтком ооцита (фаза E), были видны на срезах и резорбирующиеся фолликулярные оболочки. По-видимому, различие в степени зрелости отдельных особей в выборке объясняется одновременным подходом разновозрастных и разновеликих производителей судака к местам нереста.

Абсолютная плодовитость судака в Аграханском заливе довольно высокая и в зависимости от линейного роста колеблется от 44,2 до 511,8 тыс. икринок (таблица).

Абсолютная плодовитость судака в зависимости от длины тела
/ Absolute fecundity of walleye depending on body length

Промысловая длина тела <i>l</i> , см	Количество самок, экз.	Абсолютная плодовитость, тыс. шт.
36,0–39,0	10	$\frac{52,3 \pm 0,57}{44,2-67,4}$
39,1–42,0	7	$\frac{89,1 \pm 0,76}{57,9-119,9}$
42,1–45,0	9	$\frac{120,1 \pm 0,89}{94,6-191,2}$
45,1–48,0	12	$\frac{183,7 \pm 1,05}{155,0-244,1}$
48,1–51,0	10	$\frac{239,2 \pm 1,31}{203,6-310,7}$
51,1–54,0	6	$\frac{307,4 \pm 1,58}{283,8-396,6}$
54,1 и выше	7	$\frac{409,3 \pm 1,79}{358,2-511,8}$

Примечание. Над чертой – средняя, под чертой – min – max.

В научно-исследовательских уловах 2021 г. выборки судака были представлены шестью возрастными группами. Доминировали 3–7-годовики (95,1 % от всех возрастных категорий), при этом средний возраст составил 4,7 года. Промысловая длина в уловах колебалась от 31,5 (март) до 53,5 см (май), а масса варьировала от 360 (июль) до 1850 г (ноябрь). Средняя промысловая длина и масса судака составили 43,6 см и 1199 г соответственно. Половое соотношение в уловах составило 56,7 % самок и 40,4 % самцов.

Упитанность является одним из важных экстерьерных показателей и выражается в отношении массы тела к его объёму. Динамика упитанности, а также темпов весового и линейного роста судака представлена на рис. 1.

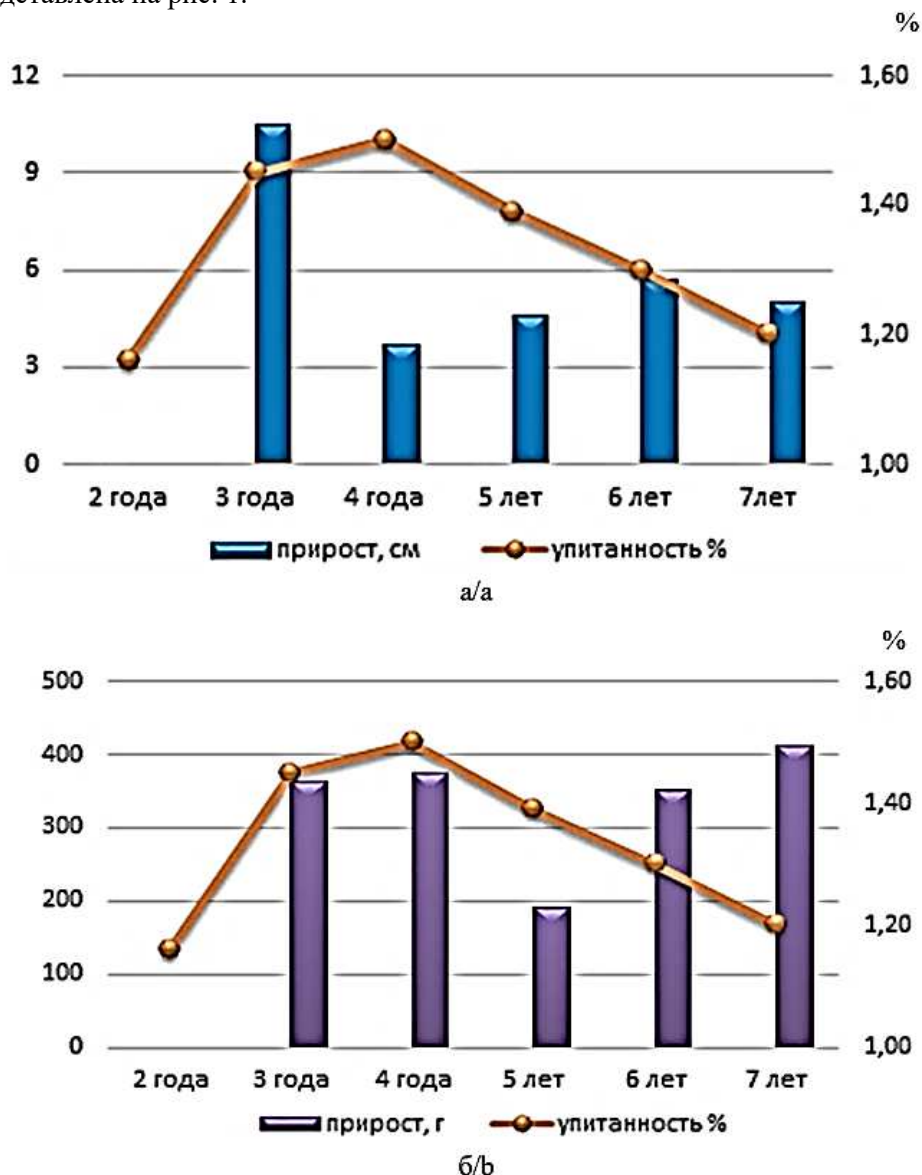


Рис. 1. Динамика темпа линейного (а) и весового (б) роста и упитанности судака в северной части Аграханского залива в 2021 г. / Fig. 1. Dynamics of the rate of linear (a) and weight (b) growth with and fatness of walleye in the northern part of the Agrakhan Bay in 2021

Из рис. 1 следует, что наиболее высокий темп линейного роста наблюдается в течение 3 лет, а весового – 7 лет, при этом упитанность характеризуется максимальным показателем 4 года, а затем этот показатель начинает постепенно снижаться.

Значения констант уравнений линейного и весового роста судака в Аграханском заливе рассчитаны методом наименьших квадратов по данным длины и массы тела рыб разного возраста. Кривые линейного и весового роста судака, построенные по уравнениям роста степенного типа И.И. Шмальгаузена, показаны на рис. 2.

Анализ рис. 2 отчетливо показывает, что с увеличением возраста темп прироста длины снижается, а темп прироста массы повышается. Установлено, что темп роста на разных этапах развития зависит от факторов внешней среды (гидролого-гидрохимический и температурный режим водоемов, режим, солевой баланс), а также обеспеченности их пищей. Пища взрослых особей судака в северной части Аграханского залива состоит преимущественно из Clupeidae (50–60 %), Atherinidae, Gobiidae, Cyprinidae, Percidae (15–20 %), включая беспозвоночных, Mysida, Caridea

(в основном *Palaemon adspersus*), Cumacea и Annelidae (15–20 %). При этом судак до 4-летнего возраста питается беспозвоночными, преимущественно Crustacea, в дальнейшем доля их уменьшается и увеличивается роль ихтиофауны. С увеличением темпа роста судака доля короткоцикловых рыб уменьшается, возрастает в рационе доля воблы.

В условиях высокой промысловой нагрузки и незаконного лова, особенно на местах размножения в зимне-весенний период, а также в связи с нестабильностью экологических условий среды обитания промысловые запасы и численность ценных промысловых рыб в северной части Аграханского залива и прилегающей акваторий снижаются, наблюдается количественное замещение ценных видов рыб менее ценными. При этом роль судака в регулировании численности рыб имеет огромное значение, так как он как активный хищник существенным образом влияет на формирование запасов малоценных мирных видов рыб. Установлено, что неучтённый, браконьерский вылов судака в рассматриваемом районе и прилегающей акватории (в частности, на Крайновском побережье) колеблется от 25 до 52 % от зарегистрированных официальной статистикой промысловых уловов [10].

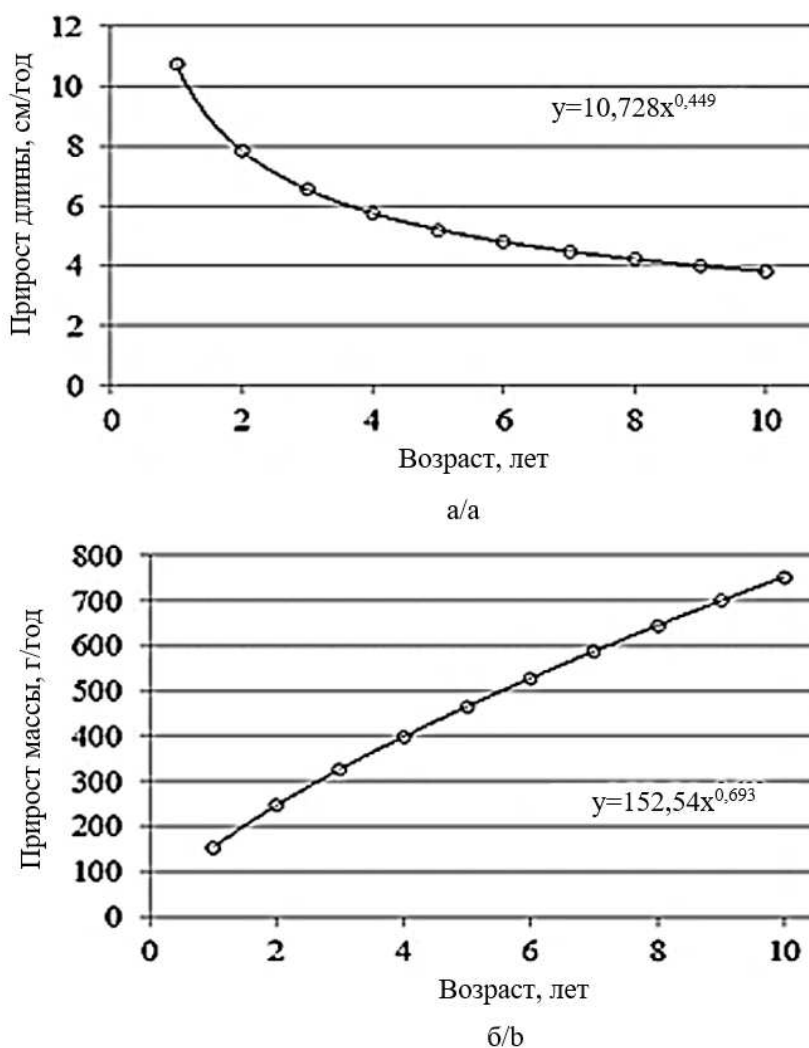


Рис. 2. Кривые темпа линейного (а) и весового (б) роста судака в Аграханском заливе / Fig. 2. Curves of linear (a) and weight (b) growth rate of walleye in the Agrakhan Bay

Проведенные исследования структуры возрастного состава судака в 2018–2021 гг. показали, что в научно-исследовательских уловах судак был представлен 6 группами, за исключением 2018 г., когда присутствовали и 8-годовики (рис. 3). Из рис. 3 видно, что в основном в уловах доминировали 3–6-годовики. В рассматриваемый период средний возраст колебался от 4,4 (2019 г.) до 5,0 года (2018 г.), средняя промысловая длина – от 36,6 (2019 г.) до 45,3 см (2018 г.), а средняя масса – от 794 (2019 г.) до 1257 г (2018 г.).

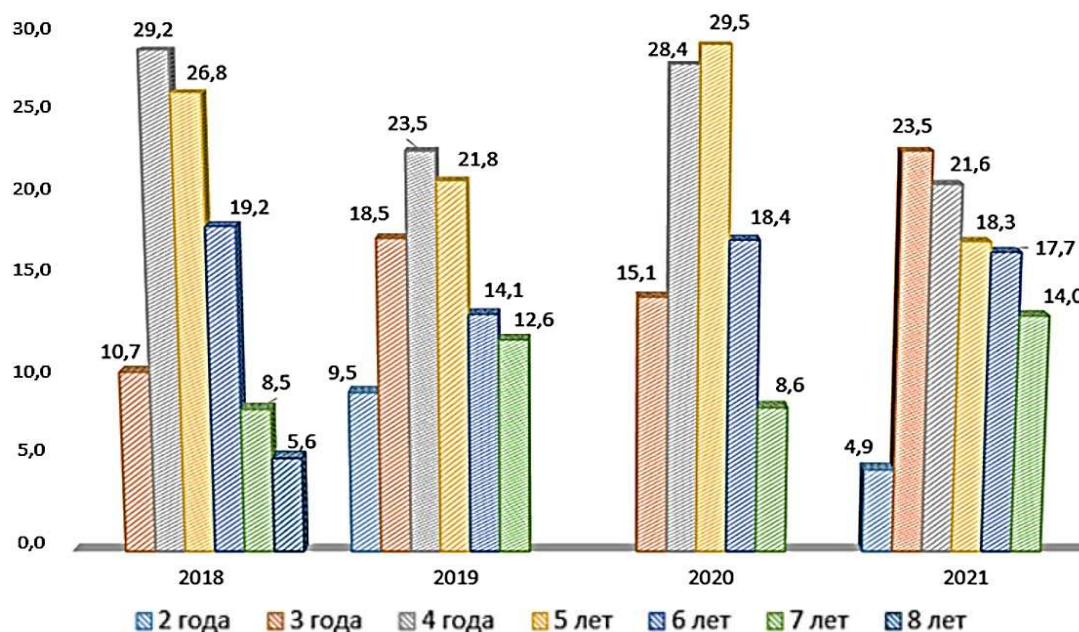


Рис. 3. Возрастная структура выборки судака в северной части Аграханского залива в 2018–2021 гг., %
/ Fig. 3. Age structure of walleye populations in the northern part of the Agrakhan Bay in 2018–2021, %

Заключение

До 2010 г. северная часть Аграханского залива оставалась важнейшим миграционным путем, местом нереста и нагула рыб генеративно-пресноводного и морского комплексов. Однако в последние годы (2019–2022 гг.), в результате критического снижения стока р. Терек и падения уровня моря Аграханский залив находится в критическом состоянии: наблюдается резкое обмеление, зарастание и ухудшение гидролого-гидрохимических показателей воды, особенно в оз. Кузнечонок и Чаканных разливах [3–5]. Кроме того, недостаточное и нерегулярное проведение необходимых мелиоративных и гидротехнических мероприятий подрывает рыбохозяйственное значение этих угодий. В 2017–2022 гг. из-за падения уровня Каспия и недостаточного поступления воды из Терека периодически происходит отшнуровывание Кубякинского миграционного канала, что препятствует миграции рыб на нерестилища, нарушено функционирование взаимодополняющей системы воспроизводства молоди в нерестово-выростных водоемах и их нагула в северной части Аграханского залива, который еще недавно был одной из ключевых акваторий для формирования промысловых запасов ценных частиковых и осетровых рыб в регионе.

В последние годы (2018–2021 гг.) в северной части Аграханского залива популяция судака находится в депрессивном состоянии. Наблюдается преобладание в стаде рыб младших возрастных групп, низкие размерно-весовые показатели (промысловая длина колебалась от 36,6 до 45,3 см, а масса – от 794 до 1257 г), снижение темпа роста (с увеличением возраста темп прироста длины снижался) и коэффициента упитанности. Результатом является слабое пополнение, что подтверждает уменьшение воспроизводительного потенциала популяции судака в Аграханском заливе. Вместе с тем популяция судака Терско-Каспийского района является одной из наиболее быстрорастущих и, несмотря на серьезные природные и антропогенные воздействия, продолжает оставаться важным промысловым объектом.

Список источников

1. Абдусаматов А.С., Мусаев П.Г., Григорьян О.П., Бархалов Р.М., Ахмаев Э.А., Таилов П.С. Перспективные направления развития рыболовства в Терско-Каспийском рыбохозяйственном подрайоне // Юг России: экология, развитие. 2014. Т. 9, № 3. С. 36–43.
2. Бархалов Р.М., Рабаданалиев З.Р. Структура популяции промысловых рыб в северной части Аграханского залива Каспийского моря // Тр. гос. природного заповедника «Дагестанский». Махачкала, 2020. Вып. 17. С. 67–80.
3. Бархалов Р.М., Рабазанов Н.И., Лобачев Е.Н., Устарбекова Д.А., Курбанов З.М., Зурхаева У.Д., Курбанова З.С., Курбанов М.С. Современное состояние и пути восстановления рыбохозяйственного значения Кизлярского и Аграханского заливов // Вестн. Даг. НЦ. 2021. № 82. С. 6–10.

4. Бархалов Р.М., Рабаданалиев З.Р., Курбанова З.С., Рамазанова Д.М. Состояние местообитаний и структура популяций промысловых рыб в северной части Аграханского залива // Тр. гос. природного заповедника «Дагестанский». Махачкала, 2022. Вып. 18. С. 67–85.

5. Magritskiy D.V., Goncharov A.V., Moreido V.M., Samokhin M.A., Abdusamadov A.S., Kuptsov S.V., Dzhamirzoev G.S., Erina O.N., Sokolov D.I., Arkhipkin V.S., Tereshina M.A., Surkov V.V., Semenova A.A. Hydroenvironmental State of the Agrakhan Bay and Means for Improvement // *Arid Ecosystems*. 2022. Vol. 12, № 4. P. 481–495.

6. Бархалов Р.М. Методические указания по сбору и обработке ихтиологического материала. Махачкала: Изд-во ДГПУ, 2014. 108 с.

7. Шихшабеков М.М., Абдурахманов Г.М., Гаджиев А.А., Бархалов Р.М. Морфогенез половых желез рыб. Махачкала, 2003. 68 с.

8. Петлина А.П. Определение плодовитости и стадии зрелости рыб. Томск: Томский гос. ун-т, 1987. 106 с.

9. Чугунова Н.И. Методика изучения возраста и роста рыб. М.: Советская наука, 1959. С. 6–33.

10. Алиева А.К., Насибулина Б.М., Абдусаматов А.С., Бархалов Р.М., Курочкина Т.Ф. Линейный и весовой рост судака в Терско-Каспийском рыбохозяйственном подрайоне // Вестн. Даг. НЦ. 2021. № 80. С. 11–16.

References

1. Abdusamadov A.S., Musaev P.G., Grigoryan O.P., Barkhalov R.M., Akhmaev E.A., Taibov P.S. Promising directions of fishing development in the Tersko-Caspian fishery subdistrict. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie = South of Russia: Ecology, Development*. 2014;9(3):36-43. (In Russ.).

2. Barkhalov R.M., Rabadanaliev Z.R. Structure of commercial fish population in the northern part of the Agrakhan Bay of the Caspian Sea. *Proceedings of the Dagestan State Nature Reserve*. Makhachkala, 2020;(17):67-80. (In Russ.).

3. Barkhalov R.M., Rabazanov N.I., Lobachev E.N., Ustarbekova D.A., Kurbanov Z.M., Zurkhaeva U.D., Kurbanova Z.S., Kurbanov M.S. The current state and ways of restoring the fishery significance of the Kizlyar and Agrakhan Bays. *Vestn. Dag. NTs = Bulletin of the Dagestan Scientific Center*. 2021;(82):6-10. (In Russ.).

4. Barkhalov R.M., Rabadanov Z.R., Kurbanova Z.S., Ramazanova D.M. The state of habitats and the structure of commercial fish populations in the northern part of the Agrakhan Bay. *Proceedings of the Dagestan State Nature Reserve*. Makhachkala, 2021;(18):67-85. (In Russ.).

5. Magritskiy D.V., Goncharov A.V., Moreido V.M., Samokhin M.A., Abdusamadov A.S., Kuptsov S.V., Dzhamirzoev G.S., Erina O.N., Sokolov D.I., Arkhipkin V.S., Tereshina M.A., Surkov V.V., Semenova A.A. Hydroenvironmental State of the Agrakhan Bay and Means for Improvement. *Arid Ecosystems*. 2022;12(4):481-495.

6. Barkhalov R.M. *Methodological guidelines for the collection and processing of ichthyological material*. Makhachkala: Dagestan State Pedagogical University Press; 2014. 108 p. (In Russ.).

7. Shikhshabekov M.M., Abdurakhmanov G.M., Gadzhiev A.A., Barkhalov R.M. *Morphogenesis of the genital glands pisces*. Makhachkala, 2003. 68 p. (In Russ.).

8. Petlina A.P. *Determination of fertility and maturity stage of fish*. Tomsk: Tomsk State University Press; 1987. 106 p. (In Russ.).

9. Chugunova N.I. *Methods of studying the age and growth of fish*. Moscow: Sovetskaya nauka Publ.; 1959:6-33. (In Russ.).

10. Alieva A.K., Nasibulina B.M., Abdusamadov A.S., Barkhalov R.M., Kurochkina T.F. Linear and weight growth of walleye in the Terek-Caspian fishery subdistrict. *Vestn. Dag. NTs = Bulletin of the Dagestan Scientific Center*. 2021;(80):11-16. (In Russ.).

Информация об авторах

Р.М. Бархалов – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория морской биологии, ПИБР ДФИЦ РАН; старший научный сотрудник, Государственный природный биосферный заповедник «Дагестанский».

Д.М. Рамазанова – научный сотрудник, лаборатория инфекционной патологии сельскохозяйственных животных.

М.В. Хлопкова – кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория морской биологии.

М.К. Мирзаханов – кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры ихтиологии.

Information about the authors

R.M. Barkhalov - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Marine Biology Laboratory, PIBR DFRC RAS; Senior Researcher, Dagestan State Nature Biosphere Reserve.

D.M. Ramazanova - Researcher, Laboratory of Infectious Pathology of Farm Animals.

M.V. Khlopkova - Candidate of Science (Biology), Researcher, Marine Biology Laboratory.

M.K. Mirzakhanov - Candidate of Science (Veterinary), Associate Professor of the Department of Ichthyology.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023; одобрена после рецензирования 10.04.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 01.03.2023; approved after reviewing 10.04.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья

УДК 631.459; 631.42

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-126-132

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИТОТОКСИЧНОСТИ ПОЧВ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ПАСТБИЩНОЙ ДИГРЕССИИ

Екатерина Андреевна Бурукина¹, Сергей Ильич Колесников²✉, Людмила Вячеславовна Яковлева³, Татьяна Владимировна Минникова⁴

^{1, 3} Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, Астрахань, Россия

^{2, 4} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹pro100-ekaterina@mail.ru

²kolesnikov@sfedu.ru✉

³yakovleva_lyudmi@mail.ru

⁴tminnikova@sfedu.ru

Аннотация. Пастбищная дигрессия является одним из основных факторов деградации и опустынивания территорий на Юге России. Воздействие нерационального выпаса сельскохозяйственных животных на растительный и почвенный покров имеет значительные негативные последствия, вследствие чего современная растительность полупустыни Северного Прикаспия в течение десятилетий сильно изменилась и приняла неблагоприятную динамику. Объектом исследования стали почвы Астраханской области, подверженные различной стадии пастбищной дигрессии. Фитоиндикацию проводили по показателям прорастания и интенсивности начального роста с помощью традиционной тест-культуры (*Raphanus sativus* L.). В результате исследования не было установлено зависимости показателей прорастания и интенсивности начального роста редиса от стадий пастбищной дигрессии. Фитотоксичность почв зависела от свойств почвы, таких как содержание гумуса, подвижного фосфора, реакция почвенного раствора, плотность почвы.

Ключевые слова: опустынивание, пастбищная дигрессия, фитоиндикация, показатели прорастания, показатели интенсивности начального роста, *Raphanus sativus* L.

Для цитирования: Бурукина Е.А., Колесников С.И., Яковлева Л.В., Минникова Т.В. Исследование фитотоксичности почв Астраханской области, подверженных пастбищной дигрессии // Изв/ вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 126–132.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева («Приоритет-2030»).

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

Original article

STUDY OF PHYTOTOXICITY OF SOILS OF THE ASTRAKHAN REGION EXPOSED TO PASTURE DIGRESSION

Ekaterina A. Burukina¹, Sergey I. Kolesnikov²✉, Lyudmila V. Yakovleva³, Tatiana V. Minnikova⁴

^{1, 3} Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

^{2, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹pro100-ekaterina@mail.ru

²kolesnikov@sfedu.ru✉

³yakovleva_lyudmi@mail.ru

⁴tminnikova@sfedu.ru

© Бурукина Е.А., Колесников С.И., Яковлева Л.В., Минникова Т.В., 2024

Abstract. Pasture digression is one of the main factors of degradation and desertification of territories in the South of Russia. The impact of unsustainable grazing of agricultural animals on plant and soil cover has significant negative consequences, as a result of which the modern vegetation of the semi-desert of the Northern Caspian region has changed greatly over the decades and has taken on unfavorable dynamics. The object of the study was the soils of the Astrakhan region, subject to various stages of pasture digression. Phytoindication was carried out according to the indicators of germination and intensity of initial growth using a traditional test culture (*Raphanus sativus* L.). As a result of the study, no dependence was established between the indicators of germination and intensity of initial growth of radish on the stages of pasture digression. Soil phytotoxicity depended on soil properties, such as humus content, mobile phosphorus, soil solution reaction, and soil density.

Keywords: desertification, pasture digression, phytoindication, germination indicators, indicators of the intensity of initial growth, *Raphanus sativus* L.

For citation: Burukina E.A., Kolesnikov S.I., Yakovleva L.V., Minnikova T.V. Study of Phytotoxicity of Soils of the Astrakhan Region Exposed to Pasture Digression. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):126-132. (In Russ.).

Acknowledgments: this research was supported by the Astrakhan State University named after. V. N. Tatishcheva Development Program (Priority-2030).

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

Почва является элементом среды, отражающим продолжительность и интенсивность притока и накопления загрязняющих веществ. Ей отводится особое место среди экологических систем, которые осуществляют многочисленные функции. Деградация почвенного покрова приводит к нарушению экологических функций почвы.

Пастбищная дигрессия – один из основных факторов деградации и опустынивания территорий, что приводит к ухудшению состояния биотических сообществ (экосистем) пастбищ из-за внешних или внутренних причин, когда из травостоя выпадают высокостебельные растения [1, 2]. Такое понятие, как оптимальная нагрузка по выпасу сельскохозяйственных животных, является фундаментальным законом сохранения растительности пастбищ. Воздействие чрезмерного выпаса сельскохозяйственных животных на растительный покров и почву наблюдается в огромных масштабах и различных проявлениях [3–5].

В течение длительного времени и при регулярном угнетении растительных сообществ во время чрезмерного выпаса сельскохозяйственных животных верхний почвенный слой, лишенный растительного покрова, получает большую инсоляцию, что приводит к повышению температуры и снижению влажности почвы.

Применение методов фитотестирования позволяет дать характеристику степени влияния изучаемого фактора, в данном случае – чрезмерного выпаса сельскохозяйственных животных, на фитоценозы пастбищ. Преимущества метода определения фитотоксичности почв – экспрессность, простота, оперативность, достоверность полученных результатов и весьма хорошая воспроизводимость. Объективность результатов исследования служит инструментом к широкому распространению фитотестов в различных областях применения.

Цель статьи – оценить фитотоксичность почв Астраханской области, подверженных пастбищной дигрессии.

Для оценки физико-химических и фитотоксических свойств почв были заложены 3 опытные площадки для отбора почвенных образцов.

Степень пастбищной дигрессии определялась с учетом показателей, описанных Л.Г. Раменским, который установил 10 стадий дигрессии пастбищ в зависимости от степени отчуждения травостоя вследствие неконтролируемого выпаса сельскохозяйственных животных, а также от степени угнетения жизнедеятельности растений [6, 7].

Точки отбора располагались на территориях, где невооружённым глазом заметна пастбищная дигрессия: полигоны Барханы (Наримановский р-он) и Кордон Харабалинский (Харабалинский р-он), село Рассвет (Наримановский р-он). На каждом объекте отбирали по три образца почвы в 3 повторностях. Расположение объектов на территории Астраханской области показано на рис. 1.

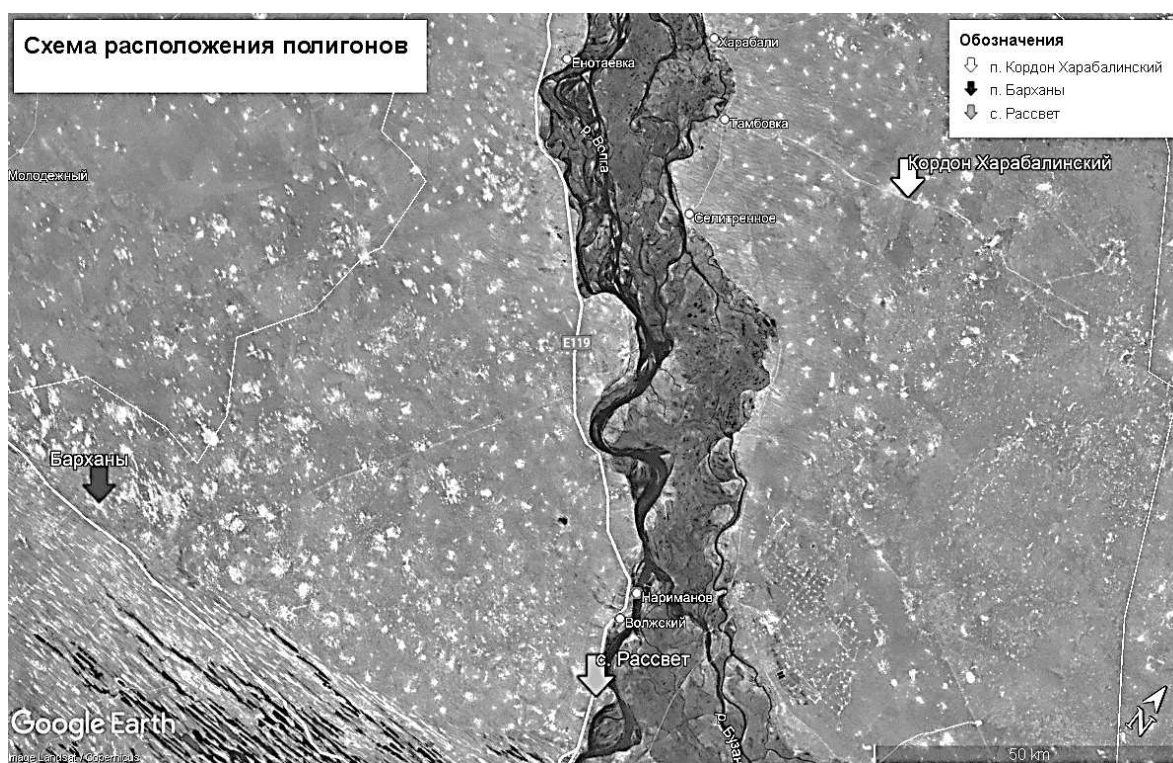


Рис. 1. Карта расположения площадок отбора / Fig. 1. A map of the location of the selection sites

На исследуемых полигонах установлены разные степени пастбищной дигрессии: от стадии № 7, когда наблюдается сильное влияние выпаса сельскохозяйственных животных (пастбищная стадия), до стадии № 10 – абсолютного сбоя: почва вытоптана и практически полностью лишена растительности (общее проективное покрытие растительностью составляет $< 0,001\%$). В таблице указаны характеристики и стадии дигрессии почвенных полигонов.

Участки, расположенные на полигоне Барханы, – это часть района с ландшафтом, представляющим северный вариант песчаной пустыни. Преобладают грядовой и барханно-бугристый рельефы с неразвитыми бурыми полупустынными почвами и своеобразной песколюбивой разреженной растительностью рогачево-верблюжеколючкового и верблюжеколючкового сообществ [8, 9]. В лаборатории было определено, что гумус в почвах практически отсутствует, его содержание в верхнем слое не превышает $0,12\text{--}0,18\%$. Его присутствие можно объяснить наносом с близлежащих гумусированных почв. Количество легкоусвояемого фосфора в верхнем слое составляет $0,4\text{--}1,4$ мг на 100 г почвы, подвижного калия – $8\text{--}13$. Реакция почвенного раствора слабощелочная – $\text{pH } 7,8\text{--}8,1$.

Почвенный покров полигона Кордон Харабалинский представлен зональными бурыми аридными супесчаными и песчаными почвами в комплексе с песками полупустынными закрепленными. Исследования показали, что содержание гумуса в верхнем горизонте составляет $0,1\text{--}0,74\%$. Реакция почвенного раствора нейтральная и щелочная, pH верхнего горизонта колеблется в пределах $7,2\text{--}8,1$. Обеспеченность почв подвижным фосфором составляет $3\text{--}6$ мг на 100 г почвы, подвижным калием – $9,1\text{--}29,6$ мг на 100 г почвы. Содержание гумуса на участке № 1, в песках, практически отсутствует ($0,1\text{--}0,3\%$), реакция среды нейтральная и щелочная ($7,5\text{--}8,1$). Содержание подвижного фосфора в верхнем слое составляет $2,9\text{--}5,6$ мг на 100 г почвы, подвижного калия – $2,2\text{--}23,0$ мг на 100 г почвы.

Почвенный покров полигона с. Рассвет – это грядово-волнистая и бугристо-барханная переверьянная равнина. После проведения анализа диагностировано, что содержание гумуса в слабозакрепленных песках практически отсутствует, а в верхнем слое не превышает $0,09\text{--}0,11\%$, в закрепленных песках – $0,13\text{--}0,19\%$. Количество легкоусвояемого фосфора в верхнем горизонте составляет $0,6\text{--}1,2$ мг на 100 г почвы, подвижного калия – $7\text{--}11$ мг на 100 г почвы. Реакция почвенного раствора щелочная – $\text{pH } 8,3\text{--}9,2$. В закрепленных песках содержание гумуса – $0,13\text{--}0,19\%$. Реакция почвенного раствора щелочная – $\text{pH } 8,9\text{--}9,03$. Содержание подвижных форм фосфора – $0,8\text{--}3,2$ мг на 100 г почвы, обменного калия – $11\text{--}32$ мг на 100 г почвы.

Местоположение и характеристики полигонов / Location and characteristics of polygons

Место отбора	Координаты	Почва	Условные обозначения	Стадия пастбищной дигрессии по Л.Г. Раменскому
п. Барханы, Наримановский р-он	N 46.30558 E 46.86050	Пески полупустынные незакрепленные	Б № 1	10
	N 46.30547 E 46.86017	Пески полупустынные слабозакрепленные	Б № 2	9
	N 46.30510 E 46.86028	Пески полупустынные закрепленные	Б № 3	8
п. Кордон Харабалинский, Харабалинский р-он	N 47.40491 E 47.83795	Пески полупустынные слабозакрепленные	КХ № 1	9
	N 47.40531 E 47.83451	Пески полупустынные закрепленные	КХ № 2	8
	N 47.40589 E 47.83744	Бурая полупустынная почва в комплексе с песками закрепленными	КХ № 3	8
с. Рассвет, Наримановский р-он	N 46.540944 E 47.925389	Пески полупустынные слабозакрепленные	Т № 1	9
	N 46.540972 E 47.925722	Пески полупустынные закрепленные	Т № 2	8
	N 46.540389 E 47.926722	Пески полупустынные закрепленные	Т № 3	7

Для агрохимического обследования выбранных полигонов отбирались образцы со всего почвенного профиля. Для исследования фитотоксичности использовали пробы из почвенного слоя 0–5 см.

Биотестирование проводилось в лабораторных условиях. Серия работ авторов продемонстрировала более высокую чувствительность именно в лабораторных методах фитотестирования по сравнению с микроделяночными и вегетационными опытами [10].

Оценку токсичности почвенных образцов осуществляли с помощью тест-культуры – редиса (*Raphanus sativus* var. *Sativus*). Прорастание семян проводили в чашах Петри в трехкратной повторности. Общее количество высаженных семян – 25 шт. на 1 чашу. Длительность эксперимента – 8 дней.

Затем определяли показатели прорастания семян (всхожесть, энергия, дружность и скорость прорастания) и показатели интенсивности начального роста семян (длина корней и зеленых побегов, масса корней и зеленых побегов) [11].

Результаты показателей прорастания семян представлены на рис. 2.

Установлено, что наибольшая всхожесть наблюдается в п. Барханы на участке № 2 – 64,0 %. Эта площадка относится к 8-й стадии пастбищной дигрессии (полусбой, большое количество несъедобных и колючих пастбищных сорняков *Alhagi pseudalhagi*). Наименьший показатель всхожести отмечается на участке № 2 с. Рассвет – 17,3 %, что может зависеть от очень низкого содержания гумуса (0,13 %) и большой плотности почвенного покрова (1,54 г/см³). Данный участок относится к 9-й стадии пастбищной дигрессии (сбой, растительный покров сильно изрежен и представлен джужгунно-песчанопольным сообществом).

Возрастающая степень пастбищной дигрессии не приводила к сильному снижению дружности и энергии прорастания семян.

Рассматривая зависимость дигрессии пастбищ и показателей прорастания семян на каждом полигоне, можно заметить, что тенденции к снижению всех показателей от степени дигрессии не отмечается. Наиболее яркий пример – участки на площадке Барханы, где наибольшие показатели прорастания семян на 9-й стадии дигрессии. На участке с 10-й стадией показатели значительно выше, чем на 7–8-й с других полигонов.

Показатели интенсивности начального роста (длина и масса зеленых побегов и корней) (рис. 3, 4) относительно показателей прорастания семян оказались чувствительнее к влиянию пастбищной дигрессии на почвенный покров.

В результате проведенных опытов можно проследить тенденцию по снижению длины и массы зеленых побегов и корней и их зависимость от стадии пастбищной дигрессии на полигонах Барханы и с. Рассвет.

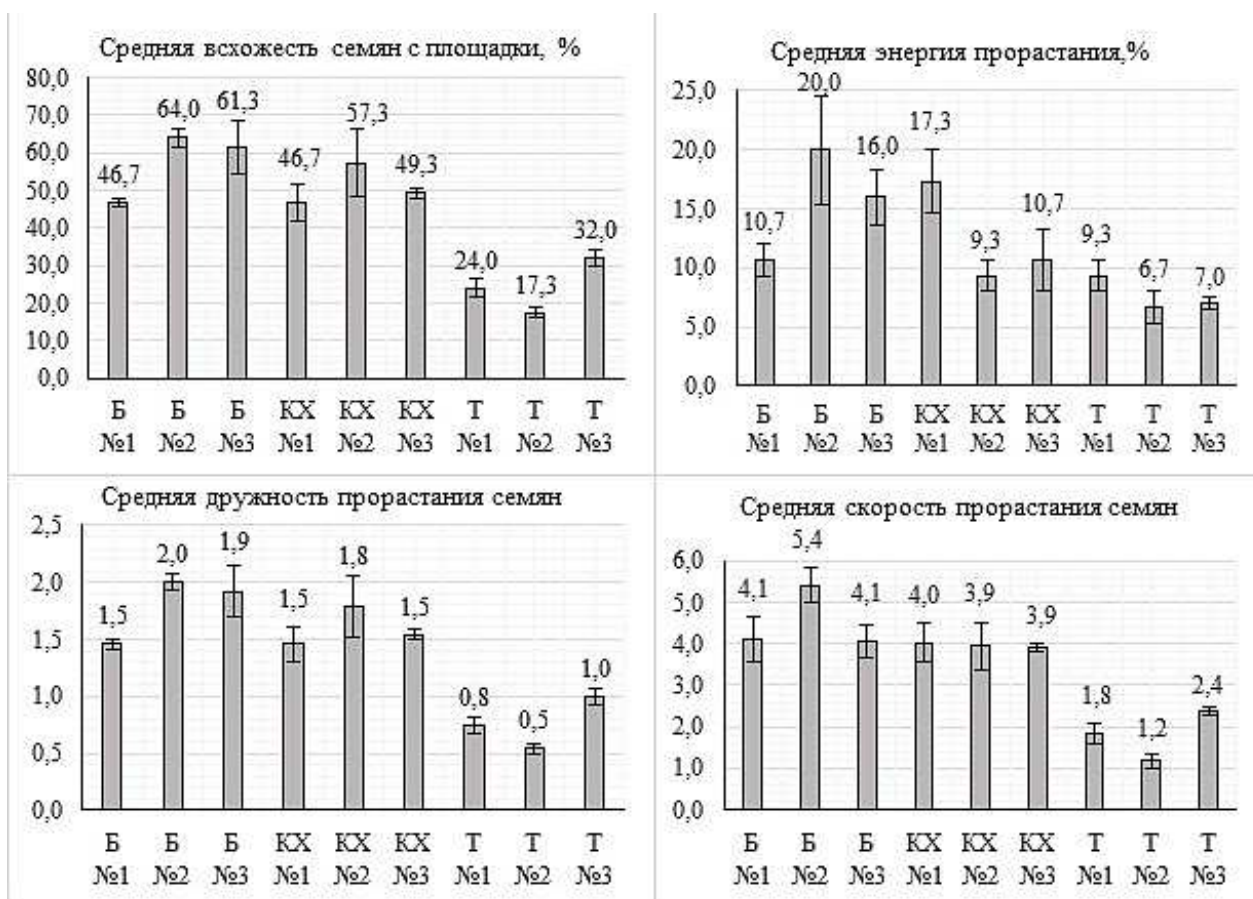


Рис. 2. Показатели прорастания семян на почвах Астраханской области, подверженных пастбищной дигрессии / Fig. 2. Indicators of seed germination on soils of the Astrakhan region exposed to pasture digression

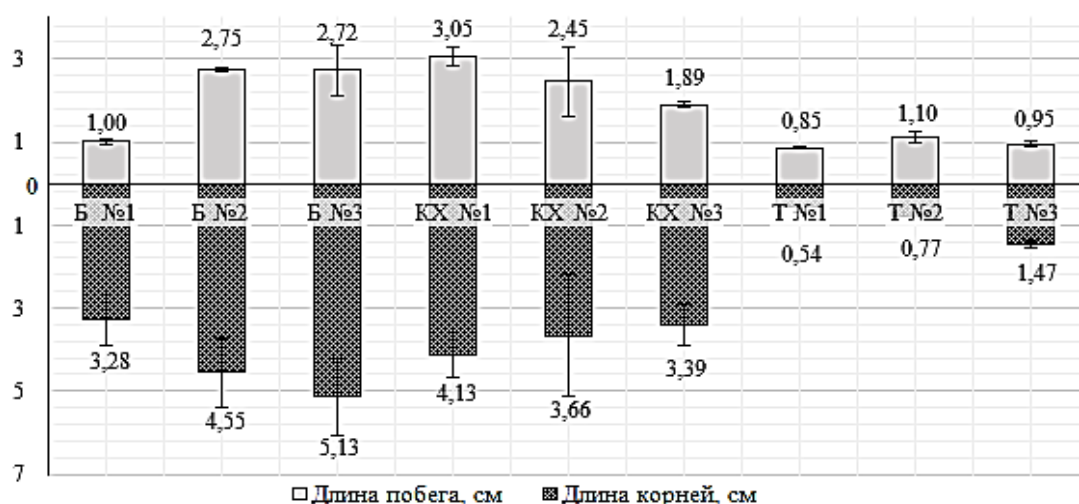


Рис. 3. Длина побегов редиса после 8 сут выращивания / Fig. 3. The length of radish seedlings after 8 days of cultivation

Оценка фитотоксичности почв Астраханской области, подверженных различной стадии пастбищной дигрессии, показала, что увеличение степени пастбищной дигрессии почв не влияет на прорастание семян и интенсивность начального роста редиса. Исследованные показатели зависели от свойств почвы (содержание гумуса и подвижного фосфора, реакция почвенного раствора, плотность почвы и т.д.).

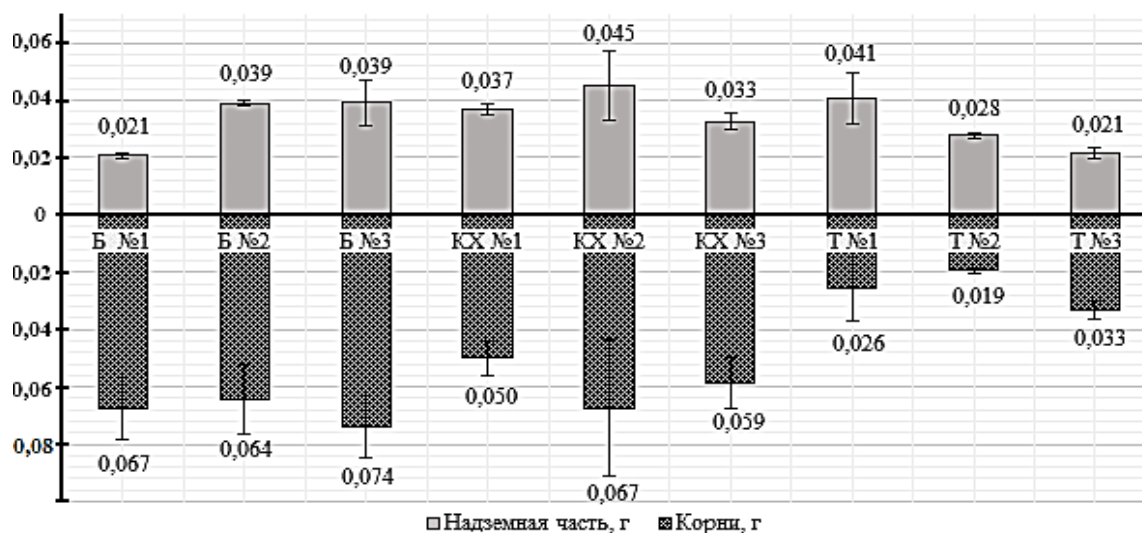


Рис. 4. Масса наземной части и корней побегов редиса
 / Fig. 4. The mass of the ground part and roots of radish seedlings

Выводы

Зависимость показателей прорастания и интенсивности начального роста редиса от стадий пастбищной дигрессии не выявлена. Фитотоксичность почв в модельном исследовании зависела от свойств почвы (содержание гумуса, подвижность фосфора, реакция почвенного раствора, плотность почвы). Ухудшение состояния естественной растительности на пастбищах, по-видимому, связано с чрезмерным выпасом скота, а не со свойствами почв.

Список источников

1. Горшкова А.А. Пастбища Забайкалья. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1973. 160 с.
2. Каримова Г.М., Аюпов Е.Е. Определение фитотоксичности почв города Уральска методом фитотестирования // Молодой ученый. 2019. № 24 (262). С. 64–65.
3. Власенко М.В. Изменения растительного покрова под влиянием выпаса сельскохозяйственных животных на пастбищных угодьях Астраханской области // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-4. С. 757–759.
4. Коробова Л.Н., Жирнова Д.Ф. Оценка состояния и пути экологизации агроландшафтов: учеб. пособие. Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2016. 90 с.
5. Магомедов К.Г. Выпас сельскохозяйственных животных как экологический фактор // Изв. Кабардино-Балкарского гос. аграр. ун-та им. В.М. Кокова. 2015. № 4 (10). С. 14–18.
6. Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз, 1956. 472 с.
7. Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
8. Салина Ю.Б., Александров С.О., Шантасов А.М., Худякова Е.А., Белялов Р.М. Агрохимическая характеристика почв Астраханской области: справочник. Астрахань: Молния, 2020. 68 с.
9. Вальков В.Ф., Жаркова М.Г. Песчаные почвы Юга России // Науч. мысль Кавказа. 2008. № 3 (55). С. 48–52.
10. Попова Е.И. Определение фитотоксичности почв города Тобольска методом биотестирования // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 4. С. 135–139.
11. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Южн. фед. ун-т, 2016. 356 с.

References

1. Gorshkova A.A. *Pastures of Transbaikalia*. Irkutsk: East-Siberian Publishing House; 1973. 160 p. (In Russ.).

2. Karimova G. M., Ayupov E.E. Determination of phytotoxicity of soils of the city of Uralsk by phytotesting method. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2019;(24):64-65. (In Russ.).
3. Vlasenko M.V. Changes in vegetation cover under the influence of grazing of farm animals on pasture lands of the Astrakhan region. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2011;(12-4):757-759. (In Russ.).
4. Korobova L.N., Zhirnova D.F. *Assessment of the state and ways of ecologization of agricultural landscapes*: textbook. Krasnoyarsk: LITERA-print Publ.; 2016. 90 p. (In Russ.).
5. Magomedov K.G. Grazing of farm animals as an ecological factor. *Izv. Kabardino-Balkarskogo gos. agrar. un-ta im. V.M. Kokova = Izvestia of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2015;(4):14-18. (In Russ.).
6. Ramenskiy L.G., Tsatsenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipin N.A. *Ecological assessment of forage lands by vegetation cover*. Moscow: Sel'khozgiz Publ.; 1956. 472 p. (In Russ.).
7. Ramenskiy L.G. *Introduction to a comprehensive soil-geobotanical study of lands*. Moscow: Sel'khozgiz Publ.; 1938. 620 p. (In Russ.).
8. Salina Yu.B., Alexandrov S.O., Shantasov A.M., Khudyakova E.A., Belyalov R.M. *Agrochemical characteristics of soils of the Astrakhan region*: handbook. Astrakhan: Molniya Publ.; 2020. 68 p. (In Russ.).
9. Val'kov V.F., Zharkova M.G. Sandy soils of the South of Russia. *Nauch. mysl' Kavkaza = Scientific Thought of the Caucasus*. 2008;(3):48-52. (In Russ.).
10. Popova E. I. Determination of phytotoxicity of soils of the city of Tobolsk by biotesting. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2016;(4):135-139. (In Russ.).
11. Kazeev K.Sh., 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.).

Информация об авторах

Е.А. Буруккина – ассистент, кафедра биотехнологии, аквакультуры, почвоведения и управления земельными ресурсами.

С.И. Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Л.В. Яковлева – доктор биологических наук, доцент, заведующая кафедрой биотехнологии, аквакультуры, почвоведения и управления земельными ресурсами.

Т.В. Минникова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

E.A. Burukina - Assistant at the Department of Biotechnology, Aquaculture, Soil Science and Land Management.

S.I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agriculture), Professor, Head of Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnologies.

L.V. Yakovleva - Doctor of Science (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Biotechnology, Aquaculture, Soil Science and Land Management.

T.V. Minnikova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnologies.

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 24.08.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 24.08.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья

УДК 663.15, 66.098

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-133-140

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НОВОГО БИОЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРА – «ГРУБОГО» ЭКСТРАКТА *SACCHAROMYCES CEREVISIAE*

Мария Валерьевна Дмитриева^{1✉}, Всеволод Андреевич Павлов²,
Полина Сергеевна Афанасьева³, Екатерина Викторовна Золотухина⁴

^{1, 2, 3, 4} Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Черноголовка, Россия

^{2, 3} Московский государственный университет, Москва, Россия

⁴ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

¹ angel.maria@mail.ru ✉

² re02ze22@gmail.com

³ afanasyeva.p@icloud.com

⁴ zolek@icp.ac.ru

Аннотация. «Грубые» экстракты, полученные путем ультразвуковой дезинтеграции микроорганизмов, являются перспективными биоэлектрокатализаторами. Экстракты из *Saccharomyces cerevisiae* представляют особый интерес, поскольку они могут содержать значительное количество ферментных систем, окисляющих простые углеводы типа глюкозы. Разработана технология получения «грубых» белковых экстрактов *Saccharomyces cerevisiae*. Процентное соотношение добавляемой глюкозы в питательную среду, а также состав буферного раствора на стадии ресуспендирования, мощность и время ультразвуковой дезинтеграции биомассы, скорость и время центрифугирования при отделении осадка разрушенных клеток от надосадочной жидкости оказывают существенное влияние на ферментативную активность получаемого «грубого» экстракта.

Ключевые слова: биоэлектрокатализаторы, белковые экстракты, *Saccharomyces cerevisiae*, дегидрогеназная активность, биотопливные элементы

Благодарности: данная работа проводилась в рамках выполнения государственного задания (№ госрегистрации 124013000692-4). Исследование М.В. Дмитриевой было поддержано стипендией Президента Российской Федерации № СП-5461.2021.1.

Для цитирования: Дмитриева М.В., Павлов В.А., Афанасьева П.С., Золотухина Е.В. Разработка технологии получения нового биоэлектрокатализатора – «грубого» экстракта *Saccharomyces cerevisiae* // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 133–140.

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

Original article

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING A NEW BIOELECTROCATALYST – “CRUDE” EXTRACT OF *SACCHAROMYCES CEREVISIAE*

Maria V. Dmitrieva^{1✉}, Vsevolod A. Pavlov², Polina S. Afanasyeva³, Ekaterina V. Zolotukhina⁴

^{1, 2, 3, 4} Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS,
Chernogolovka, Russia

^{2, 3} Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

© Дмитриева М.В., Павлов В.А., Афанасьева П.С., Золотухина Е.В., 2024

¹ angel.maria@mail.ru✉

² re02ze22@gmail.com

³ afanasyeva.p@icloud.com

⁴ zolek@icp.ac.ru

Abstract. “Crude” extracts obtained by ultrasonic disintegration of microorganisms are promising bioelectrocatalysts. Extracts from *Saccharomyces cerevisiae* are of particular interest because they may contain a significant number of enzyme systems that oxidize simple carbohydrates such as glucose. A technology for producing “crude” protein extracts of *Saccharomyces cerevisiae* has been developed. The percentage of glucose added to the nutrient medium, as well as the composition of the buffer solution at the resuspending stage, the power and time of ultrasonic disintegration of biomass, the rate and time of centrifugation during separation of the sediment of destroyed cells from the filler fluid have a significant effect on the enzymatic activity of the resulting “crude” extract.

Keywords: bioelectrocatalysts, protein extracts, *Saccharomyces cerevisiae*, dehydrogenase activity, biofuel cell

Acknowledgments: this work was carried out as part of a state assignment (state registration No. 124013000692-4). Research by M.V. Dmitrieva was supported by the scholarship of the President of the Russian Federation No. SP-5461.2021.1.

For citation: Dmitrieva M.V., Pavlov V.A., Afanasyeva P.S., Zolotukhina E.V. Development of Technology for Obtaining a New Bioelectrocatalyst - “Crude” Extract of *Saccharomyces cerevisiae*. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(1):133-140. (In Russ.).

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

Введение

Разработка биотопливных элементов является одной из актуальных задач в современной биоэлектрохимии, поскольку они могут быть применены для экологически чистого производства электроэнергии [1]. Неотъемлемым компонентом биотопливного элемента является биологический катализатор. Традиционно выделяют 3 класса биоэлектрокатализаторов: чистые ферменты [2], микроорганизмы [3] и биомиметики [4]. Ранее нами был предложен принципиально новый класс биоэлектрокатализатора: «грубый» белковый экстракт, полученный прямым разрушением клетки *E. coli* без дальнейшего выделения и очистки [5–8]. В данной работе изучаются «грубые» экстракты, получаемые из культуры *Saccharomyces cerevisiae*. Использование дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*) основано на их доступности и непатогенности, а также на предположении, что из данной культуры на выходе экстракта можно получить больше ферментных систем, способных к переработке глюкозы. Так, известно [9], что в культурах *Saccharomyces cerevisiae* в большом количестве содержится глюкозо-6-фосфат дегидрогеназа (G6PD, EC 1.1.1.49), входящая в пентозофосфатный путь.

Метод получения биокатализатора состоит из следующих стандартных технологических операций: культивирования микроорганизма и выращивания биомассы клеток; центрифугирования полученной биомассы с целью отделения культуральной жидкости от клеток; ресуспендирования осадка клеток буферным раствором; ультразвукового (УЗ) дезинтегрирования клеток; центрифугирования с целью отделения осадка разрушенных клеток от супернатанта («грубый» белковый экстракт). Получаемый экстракт является итоговым продуктом, содержащим набор ферментов, которые не подвергаются дальнейшему разделению и фактически должны составлять естественный ферментный каскад [10]. Специфика биологических объектов обуславливает их индивидуальность, вследствие чего для каждой культуры необходим подбор собственных оптимальных условий получения такого экстракта белков, который бы обладал наибольшей активностью.

Цель настоящего исследования – разработка технологии получения «грубого» белкового экстракта *Saccharomyces cerevisiae* с подбором оптимальных условий на различных стадиях технологической линии его получения. Эффективность изучаемых параметров оценивали по величине значения дегидрогеназной активности (ДГА) экстракта в отношении субстрата глюкозы.

Методика эксперимента

Получение белкового экстракта из Saccharomyces cerevisiae. Дрожжи Y-3502 выращивали в среде YPD, содержащей 2 % (в/о) пептона Vacto™ (BD, США), 1 % (в/о) дрожжевого экстракта Vacto™ (BD, США) и различные концентрации глюкозы (м/о %) в зависимости от эксперимента. Питательную среду стерилизовали в автоклаве Tuttnauer 3870 EL (Tuttnauer, Израиль) при 121 °С в течение 20 мин. Ночную культуру *Saccharomyces cerevisiae* (1 мл) вносили в 100 мл YPD в колбах 500 мл и выращивали при 32 °С при интенсивной аэрации. Через 24 ч после начала выращивания дрожжи осаждали центрифугированием при 2980 g и использовали для получения экстракта.

Осажденные дрожжи ресуспендировали в различных буферных растворах из расчета 1 мл на 50 мл выращенной культуры. Клетки разрушали на льду, на УЗ-диспергаторе УЗД2-0.1/22 с колебательной системой ПП1-0.1-22 в различных режимах мощности. Экстракты осветляли центрифугированием при различных скоростях (Eppendorf Centrifuge 5427 R, Германия).

Определение ДГА. Дегидрогеназную активность полученных экстрактов определяли при помощи 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида (ТТХ), который под действием дегидрогеназ восстанавливается до окрашенного ТТХ-формаза (ТФФ) [8].

Определение белка в экстрактах. Определение содержания общего белка вели по методу Бенедикта [11], используя спектрофотометрический метод детекции с помощью спектрофотометра Multiscan sky (Thermoscientific, Германия) при длине волны 330 нм.

Приготовление буферных растворов. В работе использован ряд разных буферных систем. Для приготовления калий-фосфатного буферного раствора (КФБ) был взят дигидроортофосфат калия, K_2HPO_4 (Panreac, ч.д.а., Испания). Для приготовления буферного раствора TRIS использовали трис(гидроксиметил)аминометан, $(\text{HOCH}_2)_3\text{CNH}_2$ (НПП «ПанЭко», ч.д.а., Россия), а для приготовления буферного раствора MOPS – 3-морфолинопропан-1-сульфоновою кислоту, $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{NO}_4\text{S}$ (НПП «ПанЭко», ч.д.а., Россия). Для приготовления буферного раствора HEPES была взята 4-(2-гидроксиэтил)-1-пиперазинэтансульфоновая кислота, $\text{C}_8\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$ (Sorachim SA, ч.д.а., Швейцария). Буферные растворы готовили на тридистиллированной воде (SZ97A Automatic third pure-water distillator, Shanghai Yarong Biochemistry instrument factory).

Нужное значение pH раствора устанавливали по pH-метру («Мультитест ИПЛ», Россия), титруя приготовленный буферный раствор 3М КОН или 10%-м раствором H_2SO_4 .

Результаты и обсуждение

Выращивание культуры – первая стадия в технологической линии получения «грубых» белковых экстрактов. На данном этапе было важно подобрать процентное соотношение добавляемой глюкозы, которая требуется не только для питания клеток, но может и служить индуктором выработки глюкозодегидрогеназных ферментных систем [12]. Как видно из табл. 1, минимальные значения удельной ДГА (т.е. соотнесенной на 1 мг общего белка в экстракте) наблюдаются у экстрактов, полученных из культур, выращенных без введения глюкозы и при 2%-м содержании глюкозы. Это можно объяснить тем, что без глюкозы не происходит должной выработки глюкозодегидрогеназных ферментных систем. Удельная активность такого образца составила лишь 0,001 мг/мг.

При 0,02%-м содержании глюкозы также наблюдается малое значение активности – 0,002 мг/мг. Наибольшее значение удельной ДГА было получено у образца, выделенного из культуры, выращенной при 0,1%-м содержании глюкозы (0,008 мг/мг). При 0,2 % уже наблюдается снижение активности до 0,002 мг/мг, а при 2%-м содержании глюкозы – до 0,001 мг/мг. Можно предположить, что такое уменьшение ДГА вызвано явлением субстратного ингибирования, и концентрация глюкозы выше 0,1 % является уже перенасыщенной для данной культуры. Таким образом, наибольший выход белка, ДГА и удельной ДГА получен у экстракта, синтезированного из культуры *Saccharomyces cerevisiae*, выращенной при 0,1%-м содержании глюкозы в питательной среде. Все дальнейшие исследования проводили на экстрактах, полученных при выращивании культуры в питательной среде с 0,1%-м содержанием глюкозы.

На стадии ресуспендирования важно было выбрать буферный раствор, поскольку его природа может оказывать существенное влияние на активность ферментов [12–14].

Таблица 1 / Table 1

Влияние содержания глюкозы при выращивании *Saccharomyces cerevisiae* на ДГА и на содержание белка у экстрактов*, полученных из данной культуры / The influence of glucose content during the cultivation of *Saccharomyces cerevisiae* on DHA and on the protein content of extracts obtained from this culture

Содержание глюкозы в культуральной среде, %	ДГА · 10 ³ , мг · мл ⁻¹	Концентрация белка, мг · мл ⁻¹	Удельная ДГА · 10 ³ , мг (ТФФ) · мг ⁻¹ (белка)
0	30 ± 3	28,9 ± 1,4	1,0 ± 0,2
0,02	40 ± 4	27,4 ± 2,7	2,0 ± 0,3
0,1	230 ± 20	29,5 ± 3,0	8,0 ± 1,2
0,2	60 ± 6	23,8 ± 2,4	2,0 ± 0,3
2	20 ± 2	23,9 ± 2,4	1,0 ± 0,2

* – экстракты получали из клеток в стационарную фазу роста.

Как видно из рис. 1, активность возрастает в ряду HEPES < TRIS < КФБ < MOPS. Причем удельная ДГА у экстракта, полученного в буферном растворе MOPS, практически в 2,5 раза больше, чем у экстракта в буферном растворе HEPES. Учитывая, что MOPS является менее доступной и экономичной буферной системой, КФБ в качестве буферной системы кажется более привлекательным.

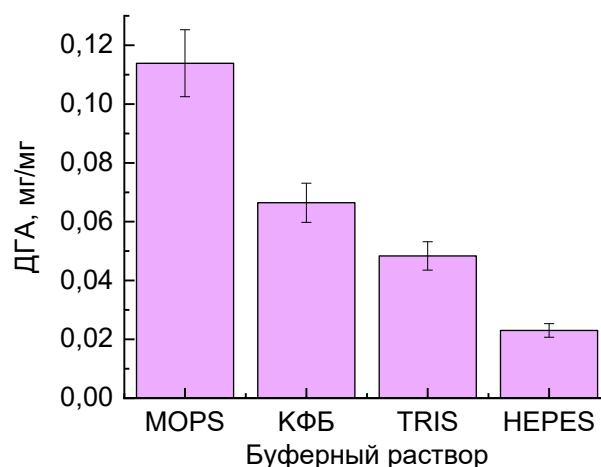


Рис. 1. Влияние природы 50 мМ буферного раствора, рН 7,2, на удельную ДГА «грубого» экстракта / Fig. 1. Influence of the nature of a 50 mM buffer solution, pH 7.2, on the specific DHA of the “crude” extract

Ионная сила буферного раствора также может оказывать значительное влияние на активность энзимов. Поэтому было изучено влияние концентраций КФБ от 25 до 100 мМ на ДГА экстрактов, полученных на их основе. Было выявлено, что наибольшей ДГА обладают экстракты, полученные на 100 мМ КФБ (рис. 2а).

Другим фактором, оказывающим влияние на активность ферментов, является значение рН раствора. Были получены экстракты, ресуспендированные в 0,1 М КФБ с различным значением рН: 6,8; 7,0; 7,2; 7,4; 7,6; 7,8. Как видно из рис. 2б, рН буферного раствора, применяемого на стадии ресуспендирования, оказывает существенное влияние на ДГА экстрактов. Наибольшей активностью обладают экстракты, полученные при значении рН 7,0.

Таким образом, оптимальной буферной системой для стадии ресуспендирования можно считать 0,1 М КФБ со значением рН 7,0.

Одной из особо важных стадий в технологической линии получения «грубых» белковых экстрактов является разрушение клеточных мембран. Во время УЗ-дезинтеграции может перегреваться обрабатываемая суспензия, что, в свою очередь, может приводить к разрушению

белковых молекул и уменьшению ферментативной активности. Напротив, недостаточное время УЗ-обработки приводит к неполному разрушению клеток и уменьшенному выходу целевого продукта. Следовательно, необходимо подобрать оптимальную мощность и время УЗ-воздействия в технологической линии получения «грубых» экстрактов из *Saccharomyces cerevisiae*.

Первоначально подбирали оптимальную мощность УЗ-дезинтеграции. Клетки разрушали на льду на УЗ-диспергаторе, варьируя мощность УЗ-воздействия в течение 5 серий. Каждая серия представляла собой 10 с УЗ-воздействия и 20 с «релаксации». Наибольшая ДГА наблюдалась у экстрактов, полученных методом УЗ-дезинтеграции при максимальной мощности 99 Вт (табл. 2). Все дальнейшие эксперименты проводились при этой мощности УЗ-воздействия.

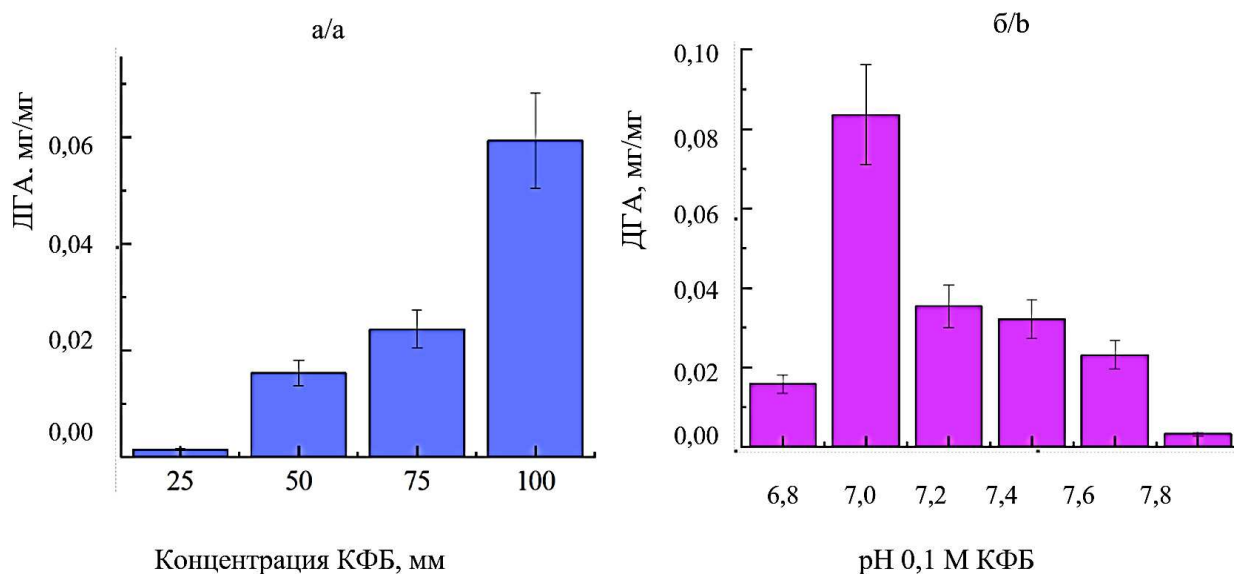


Рис. 2. Влияние концентрации КФБ (а) и рН (б) на удельную ДГА экстрактов, полученных из *Saccharomyces cerevisiae* / Fig. 2. Effect of CPB concentration (a) and pH (b) on the specific DHA of extracts obtained from *Saccharomyces cerevisiae*

Таблица 2 / Table 2

Влияние мощности УЗ-дезинтеграции клеток *Saccharomyces cerevisiae* ДГА экстрактов*, полученных из них / Influence of the power of ultrasonic disintegration of *Saccharomyces cerevisiae* cells of DHA extracts, obtained from them

Мощность УЗ, Вт	ДГА · 10 ⁻³ , мг · мл ⁻¹	Концентрация белка, мг · мл ⁻¹	Удельная ДГА · 10 ⁻³ , мг (ТФФ) · мг ⁻¹ (белка)
10	0	1,93±0,10	–
20	0	2,40±0,12	–
40	0	3,16±0,16	–
50	0	3,16±0,16	–
65	0	3,90±0,20	–
80	80±8	4,18±0,21	20±3
99	190±20	3,54±0,18	50±8

* – экстракты получали из клеток на ранних стадиях роста (менее 24 ч).

Далее необходимо было определиться с количеством серий воздействия УЗ. С этой целью клетки разрушали при выбранной мощности, варьируя число серий от 2 до 7. Как видно из рис. 3, при использовании двух и трех серий, видимо, еще не все клетки разрушены, тогда как четырех

серий достаточно для получения максимального выхода белка и высокой ДГА. Дальнейшее увеличение количества серий УЗ-воздействия приводит к снижению ДГА и белка на выходе, что свидетельствует об излишнем времени УЗ-воздействия и начале разрушения белковых молекул.

Таким образом, оптимальным режимом УЗ-дезинтеграции клеточных стенок *Saccharomyces cerevisiae* можно полагать наложение четырех серий (10 с УЗ и 20 с релаксации при 4 °С) УЗ-воздействия мощностью 99 Вт.

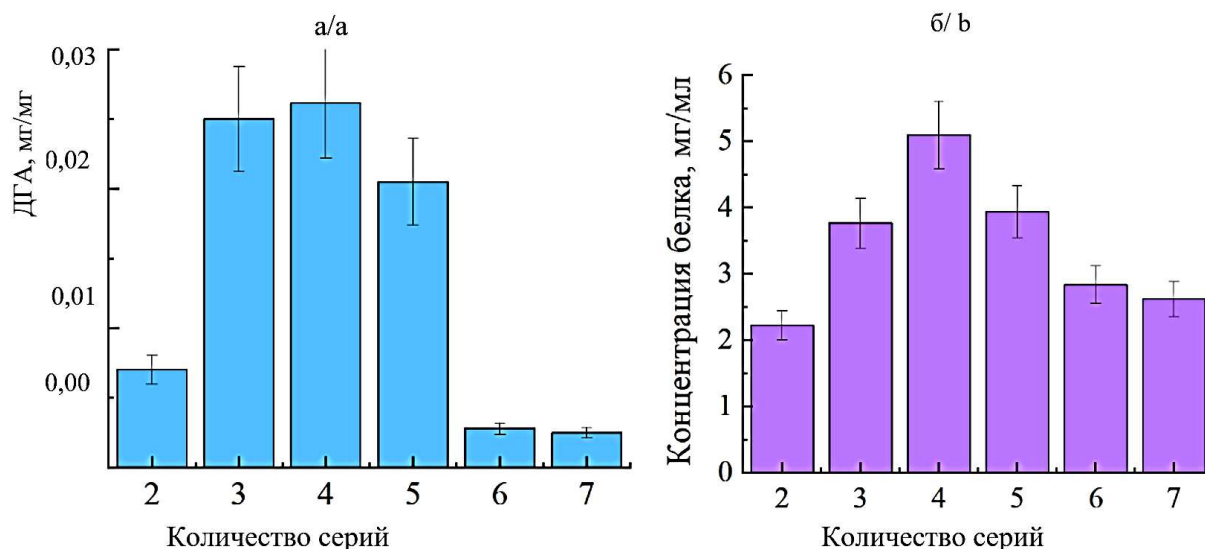


Рис. 3. Влияние количества серий УЗ-дезинтеграции (мощность 99 Вт) на удельную ДГА (а) и выход белка (б) «грубого» экстракта. 1-я серия: 10 с УЗ-воздействия, 20 с релаксации при 4 °С / Fig. 3. The influence of the number of ultrasonic disintegration series (power 99 W) on the specific DHA (a) and protein yield (b) of the “crude” extract. Series 1: 10 s of ultrasound exposure, 20 s of relaxation at 4 °C

Заключительным этапом в технологической линии получения «грубого» экстракта является повторное центрифугирование, необходимое для отделения осадка разрушенных клеток от надосадочной жидкости, которая и является целевым продуктом. Поскольку высокая скорость центрифугирования может привести к потере необходимых ферментных систем за счет их осаждения, на данном этапе было важно выбрать оптимальную скорость и время центрифугирования. Как видно из рис. 4 и 5, максимальный уровень ДГА наблюдался в экстрактах, выделенных из разрушенных клеток при минимально возможной скорости центрифугирования, 5 000 g, в течение 5 мин.

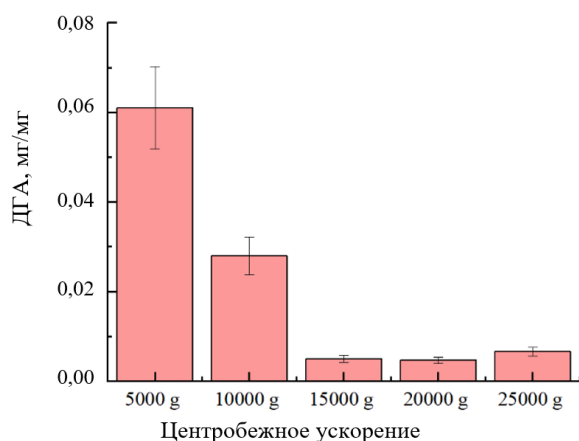


Рис. 4. Влияние скорости центрифугирования на удельную ДГА «грубого» экстракта / Fig. 4. Effect of centrifugation speed on the specific DGA of the “crude” extract

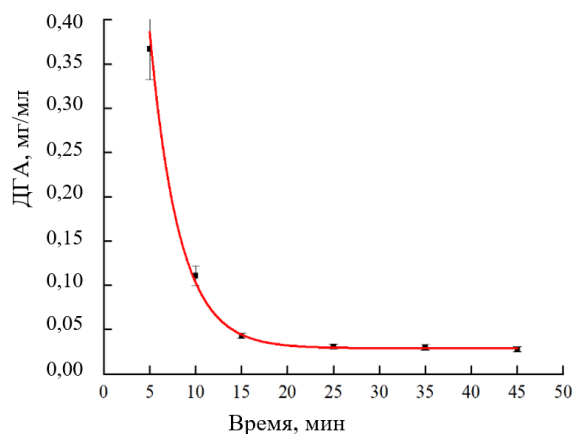


Рис. 5. Влияние времени центрифугирования при 5000 g на ДГА «грубого» экстракта / Fig. 5. Effect of centrifugation time at 5000 g on the DHA of the “crude” extract

Заключение

Выполненные исследования показали, что параметры каждого этапа технологической линии получения «грубого» экстракта оказывают существенное влияние на его ферментативную активность.

Предложена технология получения «грубых» белковых экстрактов *Saccharomyces cerevisiae* с высокой ДГА.

Список источников

1. Kavaliauskaitė G. Biofuel cell based on yeast modified with Prussian blue // *J. of Electroanalytical Chemistry*. 2023. Vol. 928. P. 117079.
2. Minteer S.D., Liaw B.Y., Cooney M.J. Enzyme-based biofuel cells // *Current Opinion in Biotechnology*. 2007. Vol. 18, № 3. P. 228–234.
3. Srivastava R.K., Boddula R., Pothu R. Microbial fuel cells: Technologically advanced devices and approach for sustainable/renewable energy development // *Energy Conversion and Management: X*. 2022. Vol. 13. P. 100160.
4. Martins M. V.A., Bonfim C., da Silva W.C., Crespilho F.N. Iron (III) nanocomposites for enzyme-less biomimetic cathode: A promising material for use in biofuel cells // *Electrochemistry Communications*. 2010. Vol. 12, № 11. P. 1509–1512.
5. Dmitrieva M.V., Zolotukhina E.V. Data describing the cofactor additives effect on bioelectrocatalytic activity of “crude” extracts // *Data in Brief*. 2020. Vol. 30. P. 105513.
6. Dmitrieva M.V., Shishov I.N., Shmalii S.V., Myazin V.D., Bazhenov A.Y., Gerasimova E.V., Zolotukhina E.V. Kinetics of mediated bioelectrocatalytic oxidation of glucose by protein extracts of *Escherichia coli* // *Russian J. of Electrochemistry*. 2020. Vol. 56. P. 938–945.
7. Dmitrieva M.V., Gerasimova E.V., Terent'ev A.A., Dobrovolskii Y.A., Zolotukhina E.V. Electrochemical peculiarities of mediator-assisted bioelectrocatalytic oxidation of glucose by a new type of bioelectrocatalyst // *Russian J. of Electrochemistry*. 2019. Vol. 55. P. 889–899.
8. Dmitrieva M.V., Zolotukhina E.V., Gerasimova E.V., Terent'ev A.A., Dobrovolskii Y.A. Dehydrogenase and electrochemical activity of *Escherichia coli* extracts // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2017. Vol. 53. P. 458–463.
9. Lojudice F.H., Silva D.P., Zanchin N.T., Oliveira C.C., Pessoa A.Jr. Overexpression of glucose-6-phosphate dehydrogenase in genetically modified *Saccharomyces cerevisiae* // *Twenty-Second Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Humana Press, 2001. P. 161–169.
10. Sokic-Lazic D., Arechederra R.L., Treu B.L., Minteer S.D. Oxidation of biofuels: fuel diversity and effectiveness of fuel oxidation through multiple enzyme cascades // *Electroanalysis: An International J. Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*. 2010. Vol. 22, № 7–8. P. 757–764.
11. Досон П. Справочник биохимика. М., Мир, 1991. 544 с.
12. D'Amato D., Corb M.R., Nobile M.A.D., Sinigaglia M. Effects of temperature, ammonium and glucose concentrations on yeast growth in a model wine system // *International J. of Food Science & Technology*. 2006. Vol. 41, № 10. P. 1152–1157.
13. Naushad M., ALOthman Z.A., Khan A.B., Ali M. Effect of ionic liquid on activity, stability, and structure of enzymes: a review // *International J. of Biological Macromolecules*. 2012. Vol. 51, № 4. P. 555–560.
14. Okur H.I., Hladilková J., Rembert K.B., Cho Y., Heyda J., Dzubiella J., Jungwirth P. Beyond the Hofmeister series: Ion-specific effects on proteins and their biological functions // *The J. of Physical Chemistry B*. 2017. Vol. 121, № 9. P. 1997–2014.

References

1. Kavaliauskaitė G. Biofuel cell based on yeast modified with Prussian blue. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2023;928:117079.
2. Minteer S.D., Liaw B.Y., Cooney M.J. Enzyme-based biofuel cells. *Current Opinion in Biotechnology*. 2007;18(3):228-234.
3. Srivastava R.K., Boddula R., Pothu R. Microbial fuel cells: Technologically advanced devices and approach for sustainable/renewable energy development. *Energy Conversion and Management: X*. 2022;13:100160.
4. Martins M.V.A., Bonfim C., da Silva W.C., Crespilho F.N. Iron (III) nanocomposites for enzyme-less biomimetic cathode: A promising material for use in biofuel cells. *Electrochemistry Communications*. 2010;12(11):1509-1512.

5. Dmitrieva M.V., Zolotukhina E.V. Data describing the cofactor additives effect on bioelectrocatalytic activity of "crude" extracts. *Data in Brief*. 2020;30:105513.
6. Dmitrieva M.V., Shishov I.N., Shmalii S.V., Myazin V.D., Bazhenov A.Y., Gerasimova E.V., Zolotukhina E.V. Kinetics of mediated bioelectrocatalytic oxidation of glucose by protein extracts of *Escherichia coli*. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2020;56:938-945.
7. Dmitrieva M.V., Gerasimova E.V., Terent'ev A.A., Dobrovol'skii Y.A., Zolotukhina E.V. Electrochemical peculiarities of mediator-assisted bioelectrocatalytic oxidation of glucose by a new type of bioelectrocatalyst. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2019;55:889-899.
8. Dmitrieva M.V., Zolotukhina E.V., Gerasimova E.V., Terent'ev A.A., Dobrovol'skii Y.A. Dehydrogenase and electrochemical activity of *Escherichia coli* extracts. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2017;53:458-463.
9. Lojudice F.H., Silva D.P., Zanchin N.T., Oliveira C.C., Pessoa A.Jr. Overexpression of glucose-6-phosphate dehydrogenase in genetically modified *Saccharomyces cerevisiae*. *Twenty-Second Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Humana Press; 2001:161-169.
10. Sokic-Lazic D., Arechederra R.L., Treu B.L., Minter S.D. Oxidation of biofuels: fuel diversity and effectiveness of fuel oxidation through multiple enzyme cascades. *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*. 2010;22(7-8):757-764.
11. Dawson R. Handbook of Biochemistry. Moscow: Mir Publ.; 1991. 544 p. (In Russ.).
12. D'Amato D., Corb M.R., Nobile M.A.D., Sinigaglia M. Effects of temperature, ammonium and glucose concentrations on yeast growth in a model wine system. *International Journal of Food Science & Technology*. 2006;41(10):1152-1157.
13. Naushad M., ALOthman Z.A., Khan A.B., Ali M. Effect of ionic liquid on activity, stability, and structure of enzymes: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2012;51(4):555-560.
14. Okur H.I., Hladílková J., Rembert K.B., Cho Y., Heyda J., Dzubiella J., Jungwirth P. Beyond the Hofmeister series: Ion-specific effects on proteins and their biological functions. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2017;121(9):1997-2014.

Информация об авторах

М.В. Дмитриева – младший научный сотрудник.

В.А. Павлов – лаборант, ФИЦ ПХФ И МХ РАН; студент, МГУ.

П.С. Афанасьева – лаборант, ФИЦ ПХФ И МХ РАН; студент, МГУ.

Е.В. Золотухина – доктор химических наук, главный научный сотрудник, ФИЦ ПХФ И МХ РАН; профессор, МФТИ.

Information about the authors

M.V. Dmitrieva - Junior Researcher.

V.A. Pavlov - Laboratory Assistant, FRC PCP MC RAS; Student, MSU.

P.S. Afanasyeva - Laboratory Assistant, FRC PCP MC RAS; Student, M.V. Lomonosov MSU.

E.V. Zolotukhina - Doctor of Science (Chemistry), Chief Researcher, FRC PCP MC RAS; Professor, MIRT.

Статья поступила в редакцию 07.06.2023; одобрена после рецензирования 10.07.2024; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 07.06.2023; approved after reviewing 19.07.2024; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья
УДК 663.125/663.252.4
doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-141-150

ВЛИЯНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВОДЫ В СОСТАВЕ ТВЕРДЫХ СРЕД КУЛЬТИВИРОВАНИЯ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРОЖЖЕЙ РОДА *SACCHAROMYCES*

Эльвира Ахмедовна Исламгагомедова^{1✉}, Эсланда Абдурахмановна Халилова²,
Аида Алевдиновна Абакарова³

^{1, 2, 3} Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия

¹ islamtagomedova@mail.ru[✉]

² eslanda61@mail.ru

³ aida.abacarva@rambler.ru

Аннотация. Исследовано влияние геотермальных вод, расположенных на территории г. Махачкалы (Республика Дагестан), в составе твердых сред культивирования на культурально-морфологические особенности дрожжей рода *Saccharomyces*. Установлены изменения свойств клеток и формирование специфических параметров гигантских колоний дрожжей *S. cerevisiae* Y-503, *S. cerevisiae* DAW-3a, *S. oviformis* M-12x. Для сред YPD и PD в результате серии экспериментов подобраны оптимальные варианты, содержащие геотермальную и дистиллированную воду в соотношении 1:1 (скважина № 36) и 2:1 (скважина № 26). Показано, что оптимальной для роста дрожжей являлась среда YPD, при этом в популяции тетраплоидного штамма Y-503 средний размер клеток был несколько больше клеток штамма M-12x и значительно превышал показатели DAW-3a. Установлено, что использование в среде культивирования разбавленной воды из скважины № 36 наиболее эффективно и приводит к ускоренному росту дрожжевых колоний. В варианте геотермальная / дистиллированная вода данный показатель превышал контроль в 1,3 (Y-503, M-12x) раза; в варианте с геотермальной водой без разбавления – в 1,6 (Y-503) и 1,4 (M-12x) раза. Для клеток штамма *S. cerevisiae* Y-503 независимо от используемой среды характерно наличие различных, в том числе удлинённых, форм; DAW-3a – исключительно округлой; *S. oviformis* M-12x – округлых и овальных форм. Сравнительный анализ параметров колоний показал, что для всех вариантов характерна округлая форма, радиально исчерченная поверхность; плоский, с выпуклым центром профиль; светло-бежевый цвет и пастообразная, мажущаяся структура. В результате наших исследований разработана модифицированная питательная среда PD-агар для выращивания дрожжей, содержащая в качестве дополнительного источника минеральных и органических соединений геотермальную воду из скважины № 36 Махачкалинского месторождения. Предложенный состав среды представляет интерес для дальнейшего использования ее в микробиологических исследованиях.

Ключевые слова: геотермальная вода, штаммы *Saccharomyces*, морфология, клетки, гигантские колонии

Для цитирования: Исламгагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А. Влияние геотермальной воды в составе твердых сред культивирования на морфологические свойства дрожжей рода *Saccharomyces* // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 141–150.

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

Original article

INFLUENCE OF GEOTHERMAL WATER IN THE COMPOSITION OF SOLID CULTIVATION MEDIA ON THE MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF THE YEAST GENUS *SACCHAROMYCES*

Elvira A. Islammagomedova^{1✉}, Eslanda A. Khalilova², Aida A. Abakarova³

^{1, 2, 3} Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

¹ islammagomedova@mail.ru✉

² eslanda61@mail.ru

³ aida.abacarva@rambler.ru

Abstract. The influence of geothermal waters located on the territory of the city of Makhachkala (Republic of Dagestan), in the composition of solid cultivation media, on the cultural and morphological features of genus *Saccharomyces* yeast was studied. Changes in cell properties and the formation of specific parameters of giant yeast colonies *S. cerevisiae* Y-503, *S. cerevisiae* DAW-3a, *S. oviformis* M-12x have been established. For YPD and PD media, as a result of a series of experiments, optimal options were selected containing geothermal and distilled water in a ratio of 1:1 (well No. 36) and 2:1 (well No. 26). It was shown that the YPD medium was optimal for yeast growth, while in the population of the tetraploid Y-503 strain, the average cell size was slightly larger than cell strain M-12x and significantly exceeded the DAW-3a values. Installed that the use of diluted water from well No. 36 in the cultivation medium is most effective and leads to accelerated growth of yeast colonies. In the variant geothermal / distilled water, this indicator exceeded the control by 1.3 (Y-503, M-12x) times; in the variant with geothermal water without dilution - by 1.6 (Y-503) and 1.4 (M-12x) times. The cells of the *S. cerevisiae* Y-503 strain, regardless of the medium used, are characterized by the presence of various forms, including elongated ones; DAW-3a - exceptionally rounded; *S. oviformis* M-12x - rounded and oval shapes. A comparative analysis of the parameters of the colonies showed that all variants are characterized by a rounded shape, a radially striated surface; flat, with a convex center profile; light beige color and pasty, spreadable texture. As a result of our research, a modified nutrient medium PD has been developed - an agar for growing yeast, containing geothermal water from well No. 36 of the Makhachkala field as an additional source of mineral and organic compounds. The proposed composition of the medium is of interest for its further use in microbiological studies.

Keywords: geothermal water, *Saccharomyces* strains, morphology, cells, giant colonies

For citation: Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Abakarova A.A. Influence of Geothermal Water in the Composition of Solid Cultivation Media on the Morphological Properties of the Yeast Genus *Saccharomyces*. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(1):141-150. (In Russ.).

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

Использование возобновляемых ресурсов в различных биотехнологиях, в частности, применение экологически безопасных геотермальных вод, в настоящее время вызывает большой интерес. Дагестан, обладающий большими запасами подземных вод, является одним из перспективных регионов России для их промышленного освоения. Изучение механизма влияния геотермальной воды в составе среды культивирования на метаболизм дрожжей имеет важное значение для поиска стрессоустойчивых штаммов. Способность микроорганизмов изменять метаболизм в различных условиях, а также определенная концентрация органических и минеральных компонентов в составе мелассной среды культивирования послужили основанием для использования геотермальных вод в качестве дополнительного источника питания дрожжевой клетки. Было создано новое научное направление, разработаны технологии производства прессованных и сухих хлебопекарных дрожжей, хлебобулочной продукции и биосинтеза этанола [1–4]. Биохимические преобразования, происходящие в различных условиях культивирования дрожжей, оказывают влияние на их морфологические свойства. Характеристика гигантских колоний, формиро-

вание которых зависит от определенных индивидуальных свойств клеток и состава среды выращивания, является параметром, по которому можно рассматривать и оценивать морфологию рода *Saccharomyces* [5–7]. Известно, что одним из механизмов адаптации рода *Saccharomyces* является полиплоидия, обеспечивающая в условиях стресса некоторое преимущество, поэтому генетически predetermined специфические особенности дрожжей представляют интерес как для научных исследований, так и поиска штаммов, толерантных к экстремальным условиям и используемых в биотехнологических процессах [8, 9]. Ранее было исследовано влияние различных значений температуры, pH, NaCl, этанола и глюкозы в составе твердых сред культивирования на морфологические особенности клеток и гигантских колоний тетраплоида *S. cerevisiae* Y-503 и гаплоида DAW-3a [10]. Определенный интерес представляет использование в исследованиях стрессоустойчивого винного штамма *S. oviformis* M-12x, полученного в результате мутагенного действия холода сверхнизких температур [2, 4].

Цель работы – изучение влияния геотермальной воды в составе твердых сред культивирования на морфологические особенности клеток и гигантских колоний дрожжей рода *Saccharomyces*.

Объекты исследования: *S. cerevisiae* Y-503 [11]; *S. cerevisiae* DAW-3a, потомок линии штамма Y-503 [12]; *S. oviformis* M-12x [13]. В данной работе использовалась среднеминерализованная, пресная, бесцветная, без запаха, со слабощелочной реакцией среды вода из скважин № 26 (координаты 42°58'34" с. ш. и 47°30'08" в. д.) и 36 (координаты 42°58'31" с. ш. и 47°30'08" в. д.), расположенных на территории г. Махачкалы (Республика Дагестан). Критерием для их отбора служили минерализация и отсутствие радиоактивности. Культивирование осуществляли в чашках Петри при температуре 30 °С; pH 4,5 в течение 10 и 20 сут. Для выращивания гигантских колоний использовались питательные среды: YPD-агар (дрожжевой экстракт – 0,5 % (BD, США), пептон – 0,5 % (BD, США), глюкоза (D-глюкоза) – 2,0 % (Merk, Германия), агар-агар – 2,5 % (Difco, Нидерланды)) и PD-агар, содержащий все перечисленные выше компоненты, кроме дрожжевого экстракта. Эти варианты служили контролем. Модифицированные варианты сред готовили на основе PD-агара и геотермальной воды различной концентрации из скважин № 36 и 26. Морфологию клеток (величина, формы, способ вегетативного размножения) изучали с помощью светового микроскопа при увеличении × 600. Основными критериями для определения морфологического типа колоний служили размер, форма, поверхность, профиль, цвет и консистенция. Окраску клеток проводили с использованием карболового фуксина Циля для обнаружения в протоплазме метахроматина, раствора судана (Судан III) – для окрашивания липидов, раствора Люголя – для выявления гликогена. В работе применялись приборы: инкубатор микробиологический BINDERBF 115 (Германия), бокс ламинарный ВЛ-12 1000 (Россия), микроскоп CX21 (Olympus, Япония), цифровая фотокамера Canon Power Shot A 640 (Япония), автоклав Tuttnauer 2540 (Израиль), весы аналитические DV215CD (Ohaus Discovery, Швейцария), шкаф сушильный SNOL 67/350 (Utenos, Литва), pH-метр «Анион-4100» («Анион», Россия).

Статистическую обработку результатов проводили методом малой выборки с вычислением средних арифметических значений и среднестатистических ошибок.

Эксперименты

Среды YPD- и PD-агар; геотермальная вода из скважин № 26 и 36; гигантские колонии штаммов *S. cerevisiae* Y-503, DAW-3a, *S. oviformis* M-12x (10 сут).

В работах [1, 4] нами была использована наиболее приемлемая концентрация геотермальной воды в составе жидкой среды культивирования дрожжей. Для твердых сред YPD- и PD-агар в результате серии экспериментов подобраны оптимальные варианты, содержащие геотермальную и дистиллированную воду в соотношении 1:1 (скважина № 36) и 2:1 (скважина № 26) (табл. 1).

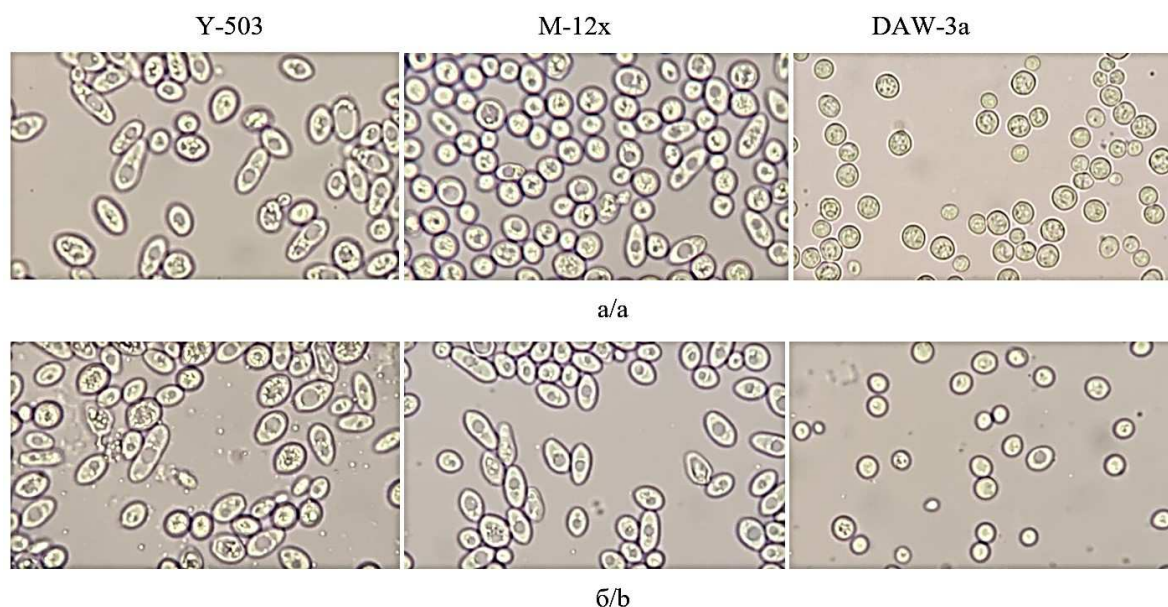
Морфометрический анализ показал, что формы клеток исследуемых штаммов дрожжей при культивировании на контрольных вариантах твердых сред обладали характерной особенностью (рис. 1).

Известно, что форма полиплоидных дрожжевых клеток благодаря организации цитоскелета близка к эллиптической. Установлено, что в среде YPD форма клеток тетраплоидного штамма Y-503 в основном овальная и яйцевидная, в меньшем количестве – овально-округлая и удлиненная; клетки штамма M-12x – округлые, небольшое количество – округло-овальные и удлиненные; штамма DAW-3a – округлые (рис. 1а).

Таблица 1 / Table 1

Состав сред для культивирования дрожжей / The composition of media for the cultivation of yeast

Вариант	Среда	Состав среды	Концентрация компонентов
К ₁	YPD-агар, дистиллированная вода (контроль ₁)	Дрожжевой экстракт (Y), пептон (P), Д-глюкоза (D), дистиллированная вода	Y – 0,5 % P – 0,5 % D – 2,0 %
К ₂	PD-агар, дистиллированная вода (контроль ₂)	Пептон (P), Д-глюкоза (D), дистиллированная вода	P – 0,5 % D – 2,0 %
О ₁	PD-агар, геотермальная вода (скважина № 36) (опыт ₁)	Пептон (P) Д-глюкоза (D), геотермальная вода (№ 36), M _{6,5} Cl ₁₅₀ SO ₄ 35 (HCO ₃ 15) Na 97 T56 ⁰ pH 7,4	P – 0,5 % D – 2,0 % № 36 – без разбавления
О ₂	PD-агар, геотермальная вода (скважина № 36) (опыт ₂)	Пептон (P), Д-глюкоза (D), геотермальная вода (№ 36)	P – 0,5 % D – 2,0 % № 36 – разбавление 1:1
О ₃	PD-агар, геотермальная вода (скважина № 26) (опыт ₃)	Пептон (P), Д-глюкоза (D), геотермальная вода (№ 26), M _{5,2} SO ₄ 46Cl 29 HCO ₃ 25 Na 98 T54 ⁰ pH 7,7	P – 0,5 % D – 2,0 % № 26 – без разбавления
О ₄	PD-агар, геотермальная вода (скважина № 26) (опыт ₄)	Пептон (P), Д-глюкоза (D), геотермальная вода (№ 26)	P – 0,5 % D – 2,0 % № 26 – разбавление 2:1

Рис. 1. Морфологические параметры клеток штаммов *S. cerevisiae* Y-503 и DAW-3a, *S. oviformis* M-12x при выращивании в контрольных твердых средах: а – YPD-агар (К₁); б – PD-агар (К₂)/ Fig. 1. Morphological parameters of cells of strains *S. cerevisiae* Y-503 and DAW-3a, *S. oviformis* M-12x when grown on control solid media: a - YPD-agar (K₁); b - PD-agar (K₂)

В контрольной среде PD появились клетки Y-503 округлой формы; наблюдались преимущественно овальные клетки M-12x; DAW-3a отличался округлой формой (рис. 1б). Обнаружено, что морфологические параметры клеток дрожжей тесно связаны с их функциональным состоянием. Так, в условиях культивирования на твердых средах с использованием геотермальной воды дрожжи испытывали определенный стресс. Происходили специфические изменения формы клеток штамма *S. cerevisiae* Y-503 – характерна не только удлиненная форма в отличие от штамма DAW-3a, но и увеличение их количества (рис. 2).

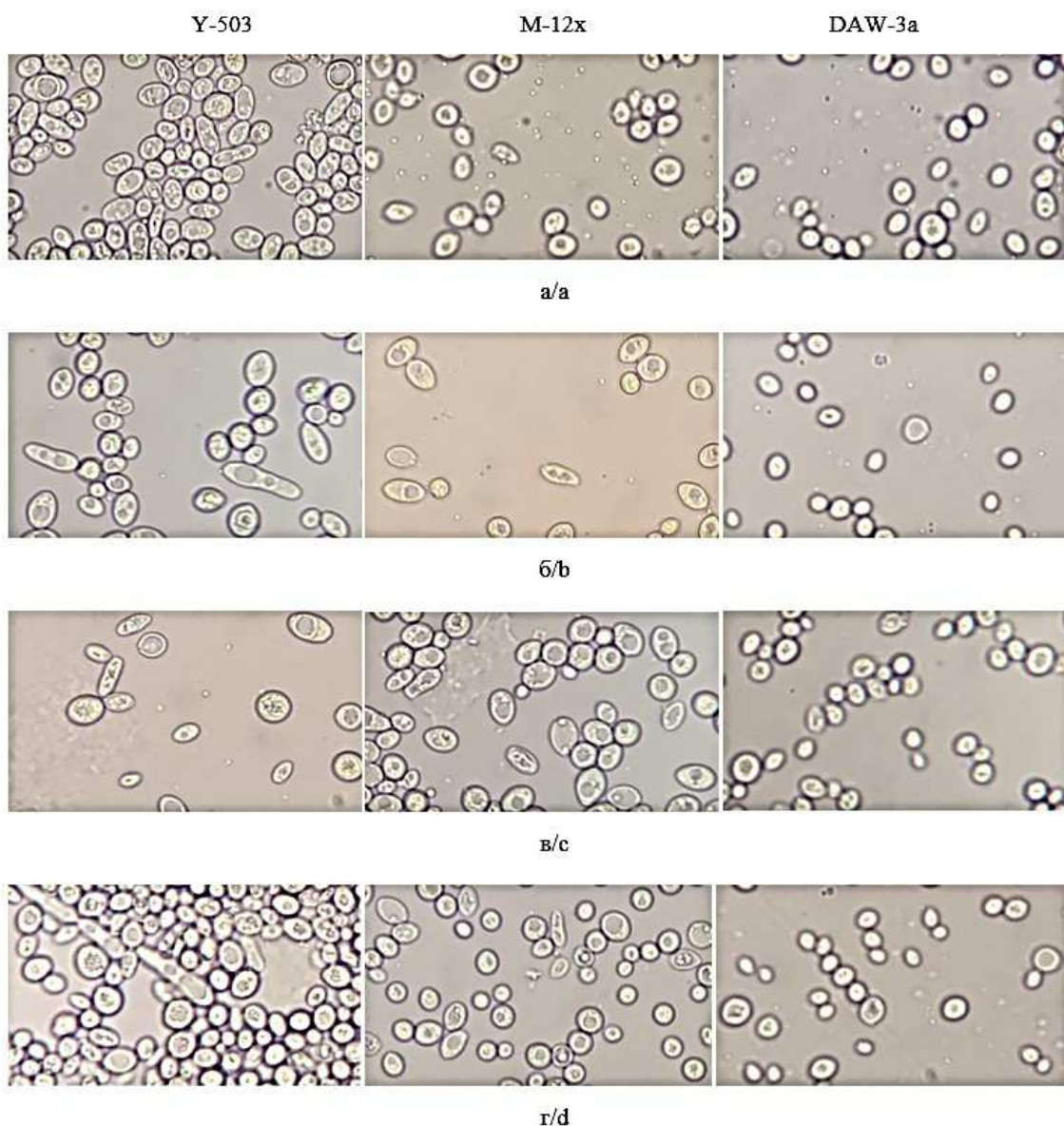


Рис. 2. Морфологические параметры клеток *S. cerevisiae* Y-503 и DAW-3a, *S. oviformis* M-12x при выращивании в опытных средах PD-агар с использованием геотермальной воды: а – скважина № 36, без разбавления; б – скважина № 36, разбавление 1:1; в – скважина № 26, без разбавления; г – скважина № 26, разбавление 2:1 / Fig. 2. Morphological parameters of *S. cerevisiae* Y-503 and DAW-3a, *S. oviformis* M-12x cells grown on experimental PD-agar media using geothermal water: a - well No. 36, without dilution; b - well No. 36, dilution 1:1; c - well No. 26, without dilution; d - well No. 26, dilution 2:1

В данных условиях клетки M-12x имели как округлую, так и овальную форму. Для клеток гаплоидного штамма DAW-3a характерна округлая форма независимо от среды. Важным параметром, который влияет на репродуктивный потенциал дрожжей и регулируется различными факторами, является размер клеток (табл. 2).

Показано, что оптимальной для роста дрожжей являлась среда YPD, при этом в популяции тетраплоидного штамма Y-503 средний размер клеток был несколько больше клеток штамма M-12x и значительно превышал показатели DAW-3a. При культивировании на средах PD с использованием геотермальной воды наблюдалось незначительное уменьшение средних размеров клеток, при этом отмечается разнообразие размеров клеток штамма Y-503 и достаточная однородность клеток – штаммов M-12x и DAW-3a. Во всех вариантах выявлено накопление запасных питательных веществ (включения гликогена и метакроматина, имеющего вид компактной массы; вкрапления липидных гранул) и почкующиеся клетки в небольшом количестве (до 1,5 %).

Таблица 2 / Table 2

Размеры клеток дрожжей *S. cerevisiae* Y-503 и DAW-3a, *S. oviformis* M-12x в зависимости от состава среды культивирования, мкм / The size of yeast cells *S. cerevisiae* Y-503 and DAW-3a, *S. oviformis* M-12x depending on the composition of cultivation medium, mkm

Среда	Штамм		
	Y-503	M-12x	DAW-3a
	Размер клетки		
YPD-агар (контроль ₁)	7×5±0,4; 6×5±0,4; 8×4±0,4	6×6±0,4; 5×5±0,4; 8×4±0,4	5×5±0,4; 4×4±0,4
PD-агар (контроль ₂)	7×5±0,4; 5×5±0,3; 8×4±0,4	7×5±0,4; 5×3±0,3; 4×4±0,3; 8×4±0,3	5×5±0,4; 4×4±0,3; 3×3±0,3
PD-агар, скв. № 36 (опыт ₁)	7×5±0,4; 6×4±0,4; 4×3±0,4; 7×3±0,4	5×5±0,4; 4×3±0,4	4×4±0,4; 3×±0,3
PD-агар, скв. № 36: разбавление 1:1 (опыт ₂)	7×5±0,4; 5×5±0,3; 3×3±0,3; 9×4±0,4	7×5±0,4; 5×4±0,4	4×4±0,4; 3×3±0,3
PD-агар, скв. № 26: разбавление 2:1 (опыт ₃)	7×5±0,4; 5×5±0,4; 4×3±0,3	6×5±0,4; 5×4±0,4; 4×4±0,4	4×4±0,4; 3×3±0,3
PD-агар, скв. № 26: разбавление 2:1 (опыт ₄)	6×6±0,4; 5×4±0,3; 3×3±0,3; 9×4±0,4	5×5±0,4; 5×4±0,4; 4×4±0,4	4×4±0,4; 3×3±0,3

Одновременно с морфологическими изменениями клеток наблюдались изменения параметров гигантских колоний исследуемых штаммов. В результате сравнительного анализа параметров колоний, выращенных на контрольных средах, установлено, что для них характерна округлая форма (кроме DAW-3a на среде PD) (рис. 3).

Во всех вариантах обнаружена радиально исчерченная поверхность; плоский, с выпуклым центром профиль; светло-бежевый цвет и пастообразная, мажущаяся структура. Исключение составляли размеры колоний. Примечательно, что на данные параметры повлияли состав среды культивирования и плоидность штаммов. Размеры колоний полиплоида Y-503 в 1,43 раза превышали показатели M-12x и DAW-3a на среде PD; на среде YPD – в 1,43 и 1,34 раза соответственно. Наличие дрожжевого экстракта в составе контрольной среды культивирования YPD (в отличие от среды PD) также повлияло на увеличение размеров колоний: Y-503 – в 1,44, M-12x – в 1,26 и DAW-3a – в 1,54 раза, что подтверждает исключительную сбалансированность среды YPD.

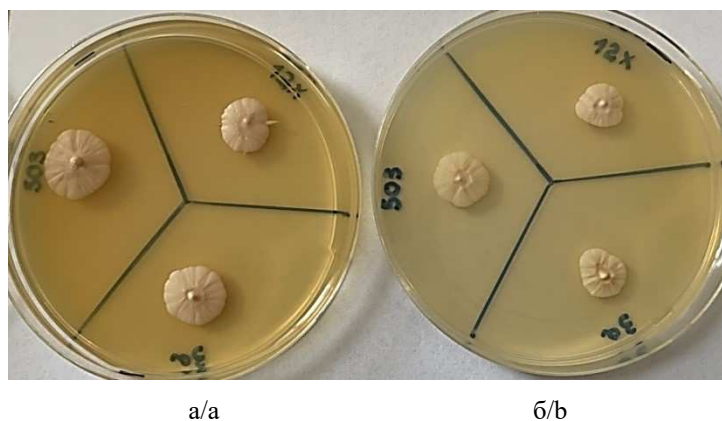


Рис. 3. Изменение размеров гигантских колоний *S. cerevisiae* Y-503, DAW-3a и *S. oviformis* M-12x (10 сут) в зависимости от состава контрольных сред культивирования: а – YPD-агар (К₁); б – PD-агар (К₂) / Fig. 3. Change in the size of giant colonies of *S. cerevisiae* Y-503, DAW-3a and *S. oviformis* M-12x (10 days) depending on the composition of the control culture media: а - YPD-agar (K₁); б - PD-agar (K₂)

Рассмотрены морфологические особенности гигантских колоний дрожжей, выращенных на обедненных средах PD с геотермальной водой из скважин № 36 и 26 (рис. 4).



Рис. 4. Гигантские колонии *S. cerevisiae* Y-503, DAW-3a и *S. oviformis* M-12x (10 сут) при выращивании на опытных средах PD-агар с использованием геотермальной воды: O₁ – скважина № 36, без разбавления; O₂ – скважина № 36, разбавление 1:1; O₃ – скважина № 26, без разбавления; O₄ – скважина № 26, разбавление 2:1 / Fig. 4. Giant colonies of *S. cerevisiae* Y-503, DAW-3a and *S. oviformis* M-12x (10 days) when grown on experimental PD-agar media using geothermal water: O₁ - well No. 36, without dilution; O₂ - well No. 36, dilution 1:1; O₃ - well No. 26, without dilution; O₄ - well No. 26, dilution 2:1

Для всех колоний характерна округлая форма, кроме овальной формы M-12x в опытах O₁ и O₄; радиально исчерченная поверхность; плоский, с выпуклым центром профиль; светло-бежевый цвет с легким розовым оттенком в центре и пастообразная структура. Обнаружено уменьшение всех колоний на средах с неразбавленными геотермальными водами, при этом наименьшими размерами отличались варианты на среде с водой из скважины № 36. Очевидно, это объясняется более высокой минерализацией и наличием органических компонентов, способных в

Таким образом, установлено, что геотермальная вода в составе твердой среды культивирования оказывает влияние на культурально-морфологические свойства клеток и, соответственно, на формирование параметров гигантских колоний дрожжей. В результате наших исследований разработана модифицированная питательная среда для выращивания дрожжей, содержащая в качестве дополнительного источника минеральных и органических соединений геотермальную воду из скважины № 36 Махачкалинского месторождения. Предложенный состав среды представляет интерес для дальнейшего использования ее в микробиологических исследованиях. Получен патент [14].

Список источников

1. Абрамов Ш.А., Котенко С.Ц., Эфендиева Д.А., Халилова Э.А., Исламмагомедова Э.А., Даунова С.М. Новая питательная среда для выращивания дрожжей // Прикладная биохимия и микробиология. 1995. Т. 31, № 2. С. 232–233.
2. Пат. 2188232 РФ. МПК C12N 1/18, C12R 1/85. Штамм дрожжей *Saccharomyces oviformis* Y-2635 для производства прессованных хлебопекарных дрожжей / Абрамов Ш.А., Котенко С.Ц., Исламова Ф.И., Халилова Э.А., Исламмагомедова Э.А. Заявл. 21.05.2001. Оpubл. 27.08.2002.
3. Пат. 2495936 РФ. МПК C12P 7/06. Способ получения этанола / Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Исламмагомедова Э.А., Аливердиева Д.А. Заявл. 24.06.2012. Оpubл. 20.10.2013.
4. *Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Kotenko S.Ts.* Using geothermal waters of Dagestan in scientific and biotechnological processes // *Arid Ecosystems*. 2016. Vol. 6 (2). P. 124–129. Doi: 10.1134/S2079096116020062.
5. *Ruusuvuori P., Lin J., Scott A., Tan Z., Sorsa S., Kallio A., Nykter M., Yli-Harja O., Shmulevich I., Dudley A.* Quantitative analysis of colony morphology in yeast // *Biotechniques*. 2014. Vol. 56 (1). P. 18–27. Doi: 10.2144/000114123.
6. *Reis V.R., Antonangelo A.T.B.F., Bassi A.P.G., Colombi D., Ceccato-Antonini S.* Bioethanol strains of *Saccharomyces cerevisiae* characterized by microsatellite and stress resistance // *Brazilian J. of Microbiology*. 2017. Vol. 48 (2). P. 268–274. Doi: org/10.1016/j.bjm.2016.09.017.
7. *Viana N.C., Portugal C., Cruz S.H.* Morphophysiological and molecular characterization of wild yeast isolates from industrial ethanol process // *African J. of Microbiology Research*. 2017. Vol. 11 (37). P. 1422–1430. Doi: 10.5897/AJMR2017.8691.
8. *Zadrag-Tecza R., Kwolek-Mirek M., Alabrudziska M., Skoneczna A.* Cell size influences the reproductive potential and total lifespan of the *Saccharomyces cerevisiae* yeast as revealed by the analysis of polyploid strains // *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2018. Vol. 2018. P. 1–17. Doi: 10.1155/2018/1898421.
9. *Zhu Y.O., Sherlock G., Petrov D.A.* Whole Genome Analysis of 132 Clinical *Saccharomyces cerevisiae* Strains Reveals Extensive Ploidy Variation // *G3: Genes|Genomes|Genetics*. 2016. Vol. X. P. 1–13. Doi: 10.1534/g3.116.029397.
10. *Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А.* Устойчивость дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* к экстремальным условиям // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 2. С. 113–118. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-113-118.
11. А.с. 1284998 СССР. МПК C12N 1/18. Штамм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-503, используемый в производстве хлебобучных изделий / Абрамов Ш.А., Котенко С.Ц., Далгатова Б.И., Маммаев А.Т., Пейсахова Д.С. Заявл. 09.04.1985. Оpubл. 23.01.1987.
12. *Аливердиева Д.А., Мамаев Д.В., Лагутина Л.С.* Транспорт сукцината в клетки *Saccharomyces cerevisiae* после продолжительной холодовой преинкубации // Прикладная биохимия и микробиология. 2009. Т. 45, № 5. С. 577–585. Doi: 10.1134/S0003683809050111.
13. А.с. 1104149 СССР. МПК C12G 1/02, C12G 1/06, C12N 1/16. Штамм дрожжей *Saccharomyces oviformis* Махачкалинская 12х, используемый для производства шампанских виноматериалов и столовых вин / Абрамов Ш.А., Котенко С.Ц., Макуев А.-С.М., Власова О.К., Нахшунов Р.И. Заявл. 21.03.1983. Оpubл. 23.07.1984.
14. Пат. 2804446 РФ. МПК C12Q 1/00. Питательная среда для культивирования дрожжей *Saccharomyces* / Халилова Э.А., Исламмагомедова Э.А., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А. Заявл. 19.12.2022. Оpubл. 29.09.2023.

References

1. Abramov Sh.A., Kotenko S.Ts., Efendieva D.A., Khalilova E.A., Islammagomedova E.A., Daunova S.M. New Nutrient Medium for Yeast Growth. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*. 1995;31(2):232-233. (In Russ.).

2. Abramov Sh.A., Kotenko S.Ts., Islamova F.I., Khalilova E.A., Islammagomedova E.A. *Yeast strain Saccharomyces oviformis Y-2635 for the production of pressed baker's yeast*. Certificate 2188232 RF. MPK C12N 1/18, C12R 1:85. Appl. 05.21.2001. Publ. 08.27.2002. (In Russ.).
3. Khalilova E.A., Kotenko S.Ts., Islammagomedova E.A., Aliverdieva D.A. *Method for producing ethanol*. Certificate 2495936 RF. MPK C12P 7/06. Appl. 06.24.2012. Publ. 10.20.2013. (In Russ.).
4. Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Kotenko S.Ts. Using geothermal waters of Dagestan in scientific and biotechnological processes. *Arid Ecosystems*. 2016;6(2):124-129, doi: 10.1134/S2079096116020062.
5. Ruusuvoori P., Lin J., Scott A., Tan Z., Sorsa S., Kallio A., Nykter M., Yli-Harja O., Shmulevich I., Dudley A. Quantitative analysis of colony morphology in yeast. *Biotechniques*. 2014;56(1):18-27, doi: 10.2144/000114123.
6. Reis V.R., Antonangelo A.T.B.F., Bassi A.P.G., Colombi D., Ceccato-Antonini S. Bioethanol strains of *Saccharomyces cerevisiae* characterized by microsatellite and stress resistance. *Braz. J. Microbiol.* 2017;48(2):268-274, doi: org/10.1016/j.bjm.2016.09.017.
7. Viana N.C., Portugal C., Cruz S.H. Morphophysiological and molecular characterization of wild yeast isolates from industrial ethanol process. *African Journal of Microbiology Research*. 2017;11(37):1422-1430, doi: 10.5897/AJMR2017.8691.
8. Zdrag-Tecza R., Kwolek-Mirek M., Alabrudzińska M., Skoneczna A. Cell size influences the reproductive potential and total lifespan of the *Saccharomyces cerevisiae* yeast as revealed by the analysis of polyploid strains. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2018;2018:1-17, doi: 10.1155/2018/1898421.
9. Zhu Y.O., Sherlock G., Petrov D.A. Whole Genome Analysis of 132 Clinical *Saccharomyces cerevisiae* Strains Reveals Extensive Ploidy Variation. *G3: Genes|Genomes|Genetics*. 2016;X:1-13, doi: 10.1534/g3.116.029397.
10. Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Gasanov R.Z., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A. Resistance of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* to extreme conditions. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(2):113-118, doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-113-118. (In Russ.).
11. Abramov Sh.A., Kotenko S.Ts., Dalgatova B.I., Mammaev A.T., Peisakhova D.S. *The strain of yeast of Saccharomyces cerevisiae Y-503, used in the production of bakery products*. Certificate 1284998 SSSR. MPK C12N 1/18. Appl. 04.09.1985. Publ. 01.23.1987. (In Russ.).
12. Aliverdieva D.A., Mamaev D.V., Lagutina L.S. Transport of succinate into *Saccharomyces cerevisiae* cells after prolonged cold preincubation. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*. 2009;45(5):577-585, doi: 10.1134/S0003683809050111. (In Russ.).
13. Abramov Sh.A., Kotenko S.Ts., Makuev A.-S.M., Vlasova O.K., Nakhshunov R.I. *Yeast strain Saccharomyces oviformis Makhachkala 12x, used for the production of sparkling wine materials and table wines*. Certificate 1104149 SSSR. MPK C12G 1/02, C12G 1/06, C12N 1/16. Appl. 03.21.1983. Publ. 07.23.1984. (In Russ.).
14. Khalilova E.A., Islammagomedova E.A., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A. *Nutrient medium for cultivating the yeast Saccharomyces*. Certificate 2804446 RF. MPK C12Q 1/100. Appl. 12.19.2022. Publ. 09.29.2023. (In Russ.).

Информация об авторах

Э.А. Исламмагомедова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии.

Э.А. Халилова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии.

А.А. Абакарова – старший лаборант лаборатории биохимии и биотехнологии.

Information about the authors

E.A. Islammagomedova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of Laboratory of Biochemistry and Biotechnology.

E.A. Khalilova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher of Laboratory of Biochemistry and Biotechnology.

A.A. Abakarova - Senior Assistant of Laboratory of Biochemistry and Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 07.09.2023; одобрена после рецензирования 14.10.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 07.09.2023; approved after reviewing 14.10.2023; accepted for publication 19.02.2024.

Научная статья

УДК 631.41

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-151-161

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФИТОМЕЛИОРАНТОВ НА ПЛОДОРОДИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АГРОГЕННЫХ ПОЧВ ПРИМОРЬЯ

Л.Н. Пуртова¹, И.В. Киселева^{2✉}, Я.О. Тимофеева³, А.Н. Емельянов⁴, Н.Л. Клочкова⁵

^{1, 2, 3} Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

^{4, 5} Федеральный научный центр агrobiотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Тимирязевский, Россия

¹ Purtova@biosoil.ru

² Kiseleva-iv@inbox.ru✉

³ Timofeeva@biosoil.ru

⁴ Emelyanov.prim@yandex.ru

⁵ Klochova128@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние различных фитомелиорантов на содержание и запасы гумуса, микроэлементов, микрофлору и оптические показатели агрогенных почв Приморья. Посев бобовых трав с однолетними и многолетними культурами способствовал активизации процессов гумусонакопления, увеличению биогенности и каталазной активности почв. Наиболее позитивное влияние на увеличение содержания гумуса, каталазной активности и биогенности почв в опыте с однолетними травами отмечено для варианта «овес + вика». Запасы гумуса достигали уровня средних значений. На варианте опыта «овес + бобы» количество гумуса и его запасы в слое 20 см снижались в связи с переувлажнением почв и ослаблением процессов трансформации органического вещества микрофлорой. В опыте с многолетними травами наибольшее содержание гумуса и показатели каталазной активности зафиксированы на варианте «timoфеевка + люцерна», наибольшими запасами гумуса и биогенностью отличался вариант «timoфеевка + клевер + люцерна». В связи с уменьшением показателей плотности сложения почв на варианте с посевом травосмеси timoфеевка + люцерна запасы гумуса в слое 20 см несколько снижались (до 108,6 т/га). Установлена тесная обратная корреляционная связь между содержанием гумуса и интегральным отражением. При сопоставлении с региональными кларковыми значениями выявлена несбалансированность микроэлементного состава исследованных образцов верхнего горизонта почв.

Ключевые слова: почва, содержание гумуса, микрофлора, каталазная активность, оптические показатели почв, фитомелиорация, макро- и микроэлементный состав почв

Для цитирования: Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Тимофеева Я.О., Емельянов А.Н., Клочкова Н.Л. Влияние различных фитомелиорантов на плодородие и оптические показатели агрогенных почв Приморья // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 151–161.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400285-7, тема № 122022600068-5).

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

Original article

EFFECTS OF VARIOUS PHYTOMELIORANTS ON FERTILITY AND OPTICAL INDICATORS OF AGROGENIC SOILS OF PRIMORYE

L.N. Purtova¹, I.V. Kiseleva^{2✉}, Ya.O. Timofeeva³, A.N. Emelyanov⁴, N.L. Klochkova⁵

^{1, 2, 3} Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

^{4, 5} A.K. Chaika Federal Scientific Center of Agrobiotechnology of the Far East, Timiryazevsky, Russia

© Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Тимофеева Я.О., Емельянов А.Н., Клочкова Н.Л., 2024

¹ Purtova@biosoil.ru

² Kiseleva-iv@inbox.ru

³ timofeeva@biosoil.ru

⁴ Emelyanov.prim@yandex.ru

⁵ Klochova128@mail.ru

Abstract. The influence of various phytomeliorants on the content and reserves of humus, the content of microelements, microflora and optical parameters of agrogenic soils of Primorye were studied. Sowing legumes with annual and perennial crops activates the processes of humus accumulation, increases the biogenicity and catalase activity of soils. The most positive effect on the increase in humus content, catalase activity and soil biogenicity in the experiment with annual grasses was noted for the “oats + vetch” guide. Humus reserves reached the level of average values. In the variant of the experiment, “oats + beans”, the amount of humus and its reserves in the 20 cm layer decreased due to waterlogging of the soil and the weakening of the processes of transformation of organic matter by microflora. In the experiment with perennial grasses, the highest humus content and indicators of catalase activity were recorded for the “timothy grass + alfalfa” variant, the “timothy grass + clover + alfalfa” variant differed in the largest reserves of humus and biogenicity. Due to the decrease in the density of soil composition, in the variant with the sowing of the grass mixture of timothy “grass + alfalfa”, the humus reserves in the 20 cm layer decreased slightly (to 108.6 t/ha). A close inverse correlation was established between the addition of humus and the integral reflection. When considering with regional Clarke values, an imbalance in the microelement composition of the studied soil samples of the upper horizon was revealed.

Keywords: soil, humus content, microflora, catalase activity, optical indicators of soils, phytomelioration, macro- and microelement composition of soils

For citation: Purtova L.N., Kiseleva I.V., Timofeeva Ya.O., Emelyanov A.N., Klochkova N.L. Effects of Various Phytomeliorants on Fertility and Optical Indicators of Agrogenic Soils of Primorye. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(1):151-161. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 124012400285-7, topic No. 122022600068-5).

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

Введение

Территория Приморского края относится к зоне рискованного земледелия. Многолетние обильные и длительные осадки с последующими затяжными наводнениями вызывают существенные негативные изменения в состоянии почвенного покрова. Усиливается напряженность разнообразных миграционных процессов (от внутрипрофильной миграции гумуса до смыва пахотных горизонтов), что приводит к негативному экологическому прессингу на почвенный покров большинства земледельческих районов края. К наиболее эффективно используемым почвам в земледелии края относятся агротемногумусовые подбелы, в которых в последнее время отмечена тенденция к снижению содержания гумуса [1]. Возникает необходимость проведения мониторинговых исследований экологического состояния этих почв. При этом сохранение гумуса, улучшение его состава и увеличение содержания выступают одной из актуальных задач в земледелии региона наряду с разработкой экологически чистых малозатратных приемов увеличения плодородия. К таким комплексным приемам относится фитомелиорация – повышение почвенного плодородия, при котором используется природный потенциал самих растений [2]. Фитомелиорация, наряду с агротехническими приемами обработки почвы, нашла широкое применение в России и за рубежом [3, 4]. Зарубежными авторами роль фитомелиорации рассматривается в основном как фиторемедиация – очищение почв, ила, грунта от тяжелых металлов с помощью посева трав. Многочисленными исследованиями [5, 6] отмечено позитивное влияние фитомелиорации на улучшение свойств почв и повышение их плодородия. В последнее время обращено внимание на эффективное использование сеносеменных смесей на основе бобовых и злаковых трав [7]. Установлено положительное влияние многолетних трав с бобовыми культурами на структурно-агрегатное состояние и снижение эрозионных процессов в черноземах степного Зауралья Республики Башкортостан, Северного Казахстана [3]. Выявлено улучшение физических

и водно-физических свойств засоленных черноземно-луговых почв под действием искусственно посеянных многолетних трав [8].

Таким образом, фитомелиорация эффективно используется для повышения плодородия довольно широкого спектра почв. Этот метод весьма актуален и для восстановления плодородия почв Приморья, длительное время используемых в рисосеянии (агрообраземы), в которых выявлены негативные закономерности в снижении содержания гумуса и изменении его качественного состава [9]. Выявлено позитивное влияние фитомелиорантов на плодородие агрообраземов суходольной части мелиоративной системы [10].

Однако приёмы использования фиторесурсов для восстановления плодородия почв с помощью травосмесей изучены недостаточно полно [11]. В работах ряда авторов неоднократно отмечалась тенденция к снижению содержания гумуса в пахотных горизонтах и негативным изменениям в его качественном составе. Поэтому необходимо уделять более пристальное внимание изменениям в показателях их гумусного состояния, а также в процессах трансформации органического вещества, связанных с функционированием микрофлоры, и выбору параметров для индикации их изменения. К одним из таких показателей относится интегральное отражение почв. Для выбора наиболее эффективных фитомелиорантов нужен как всесторонний анализ физико-химических показателей почв, так и исследование её микробиологической активности.

Цель данной работы – изучение влияния различных фитомелиорантов на содержание и запасы гумуса, содержание микроэлементов, микробиологические и оптические показатели агрогенных почв Приморья.

Основные задачи:

1. Выявление изменений в содержании и запасах гумуса в условиях полевого опыта с посевами различных фитомелиорантов.
2. Изучение микрофлоры и каталазной активности почв.
3. Исследование оптических параметров почв.
4. Анализ изменений микроэлементного состава почв с посевами различных фитомелиорантов.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований послужил агротемногумусовый подбел глееватый (лугово-бурая отбеленная почва, или Luvic Albic Stagnosol (Loamic, Agric)). Почвы сформированы на равнинном участке опытного поля (пос. Тимирязевский Уссурийского района Приморского края). В работе использованы названия почв согласно российской классификации 2004 г. [12], Г.И. Иванову [13] и международной (WRB) 2014 г. [14]. Почва имеет следующее морфологическое строение профиля: PU (0–25 см) – Elnng (25–47 см) – BTg (47–102 см) – Cg (102 см и ниже).

Отбор смешанных почвенных образцов с исследуемых участков до закладки опыта осуществляли методом конверта из агротемногумусового горизонта (PU).

В работе применены методы, общепринятые в почвоведении и микробиологии почв: pH почв определены потенциметрически, содержание гумуса – по методу Тюрина, подвижные соединения фосфора – по Гинзбург – Артамоновой, калия – по Кирсанову [15]. Оценка содержания и запасов гумуса дана по грациям, предложенным Д.С. Орловым с соавт. [16], основных физико-химических и агрохимических свойств почв – по оценочным шкалам, разработанным В.И. Ознобихиным, Э.П. Синельниковым [17]. Запасы гумуса (т/га) рассчитаны по формуле $\Gamma \times H \times d$, где Γ – содержание гумуса, %; H – мощность горизонта, см; d – плотность сложения почвы, т/см³. Плотность сложения почв исследована весовым методом [18].

Изучение оптических свойств почв, связанных с содержанием гумуса, проводилось на спектрофотометре СФ-18. На приборе производилась запись спектрального отражения (ρ , %) в диапазоне видимого спектра от 420 до 740 нм, с шагом 20 нм, и на их основе рассчитывались параметры интегрального отражения почв (R , %) [19].

При определении ферментативной активности основное внимание уделялось ферменту из класса оксидоредуктаз – каталазе. Каталазная активность (Ка) исследована газометрическим методом по А.Ш. Галстяну. Микробиологические показатели почв определены общепринятыми в почвенной микробиологии методами [20].

Элементный состав почв определяли методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии (EDX) на анализаторе EDX 800HS-P (Shimadzu, Япония), оснащенном родиевым катодом, в формате количественного анализа в вакуумной среде с использованием государственных стандартных образцов сравнения (ГСО 901-76, ГСО 902-76, ГСО 903-76, ГСО 2498-83, ГСО 2499-83, ГСО 2507-83). Измерение содержания элементов проводили в соответствии с методикой М-02-0604-2007 в трехкратной повторности [21].

Математическая обработка данных проводилась по общепринятым методикам с применением программ Statistica и Microsoft Excel 2007.

Исследования были проведены на полевых опытах с посевом многолетних и однолетних трав и их травосмесей с бобовыми культурами, заложенных на опытных полях ФНЦ агробиотехнологий ДВ им. А.К. Чайки по схеме: I. Однолетние культуры: 1. Овес (контроль). 2. Овес + вика. 3. Овес + горох. 4. Овес + бобы; II. Многолетние культуры: 1. Тимофеевка (контроль). 2. Тимофеевка + клевер. 3. Тимофеевка + люцерна. 4. Тимофеевка + клевер + люцерна.

Результаты и обсуждение

Исследуемые почвы приурочены к Приморской юго-западной гидротермической провинции, для которой характерны высокие среднегодовые показатели выпадения осадков (до 800 мм), радиационного баланса (52,2 ккал/см² в год) и затрат энергии на почвообразование (44,9 ккал/см² в год) [22, 23]. Неравномерное выпадение осадков в течение года вызывает сильное переувлажнение почв летом и иссушение в осенне-зимний период. За период вегетации растений сумма активных температур свыше 10 °С составила 2778 °С, сумма осадков 657,8 мм (ГТК=2,37 – избыточно-влажный). Количество осадков в июне, июле и августе превысило в 1,2–2,3 раза средние многолетние нормы выпадения осадков. Складывающиеся метеорологические условия отразились на протекании процессов гумусоаккумуляции.

В горизонте PU на участке до посева однолетних трав и их травосмесей содержание гумуса варьировало от 5,1 до 6,0 %. Значение рН_{H2O} изменялось от 6,58 до 7,02; рН_{KCl} – от 5,87 до 6,36. На участке, подготовленном для посева многолетних трав и их травосмесей, рН_{H2O} составил 6,90–7,05, рН_{KCl} – 6,00–6,20. На этом участке содержание гумуса изменялось от 4,4 до 6,3 %. Содержание подвижного калия в горизонте PU на исследованных участках соответствовало уровню очень высоких значений – от 48,0 до 51,4 мг/100 г почвы, количество подвижного фосфора в основном достигало средних значений от 12,5 до 13,7 мг/100 г почвы.

На вариантах с посевом трав гумусообразование в исследуемых почвах протекало в основном в условиях слабокислой реакции среды: рН_{H2O} под посевами однолетних трав составил от 6,16 до 6,37, под многолетними – от 6,25 до 6,33. Отмечалось незначительное снижение показателей рН по сравнению с участками без посева трав. Содержание гумуса в горизонте PU, согласно оценочным грациям Д.С. Орлова с соавторами [16], в исследуемых вариантах опыта находилось на уровне ниже средних значений. В посевах травосмесей с бобовыми травами установлено повышение содержания гумуса по сравнению с чистой культурой овса (рис. 1). Для вариантов «овес + вика», «овес + горох» выявленные различия по сравнению с контролем статистически значимы (значения t-критерия Стьюдента составили 3,61 и 2,78 соответственно). Однако для вариантов «овес» и «овес + бобы» статистически значимых различий в содержании гумуса не установлено.

Увеличение содержания гумуса, на наш взгляд, обусловлено дополнительным поступлением азота в результате азотфиксации бобовыми культурами и усилением процессов трансформации органического вещества микрофлорой. Наиболее высокие показатели содержания гумуса и его запасов зафиксированы на варианте опыта с посевом травосмеси «овес + вика». Запасы гумуса достигали уровня средних значений на вариантах опыта «овес + вика» и «овес + горох». В связи с переувлажнением почв и ослаблением процессов трансформации органического вещества микрофлорой на варианте опыта «овес + бобы» количество гумуса и его запасы в слое 20 см снижались (рис. 2).

Для вариантов опыта с более низким содержанием гумуса (овес, овес + бобы) свойственна бедная обогащенность почв каталазой. При возрастании гумусированности горизонта PU обогащенность почв каталазой возрастала до средних показателей (табл. 1).

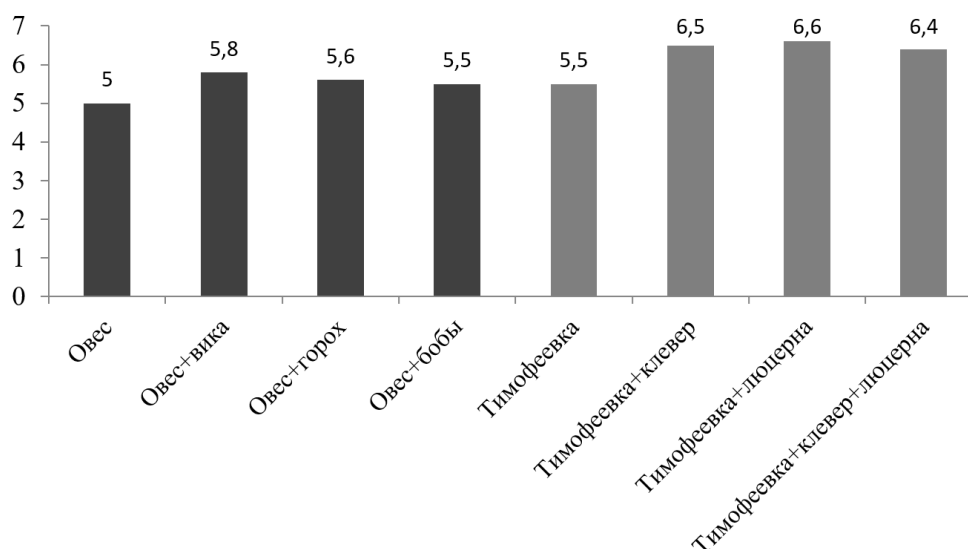


Рис. 1. Изменение содержания гумуса в агротемногумусовых почвах в условиях фитомелиоративного опыта: по оси абсцисс – варианты опыта; по оси ординат – содержание гумуса, % / Fig. 1. Changes in the content of humus in Luvic Albic Stagnosol (Loamic, Aric) under the conditions of a phytomeliorative experiment: on the abscissa axis - variants of the experiment; on the ordinat axis - humus content, %

Опыт с посевами многолетних трав и травосмесей с бобовыми культурами показал, что содержание гумуса в горизонте PU возрастало и изменялось в диапазоне от нижесредних до средних значений. Наибольшее содержание гумуса зафиксировано на варианте опыта «timoфеевка + люцерна» и «timoфеевка + клевер». По сравнению с чистой культурой тимофеевки на вариантах с посевами травосмесей установлены статистически значимые различия в содержании гумуса (значения t-критерия Стьюдента составили 3,28; 3,81 и 3,07). Наибольшие запасы гумуса в слое 20 см свойственны опытам «timoфеевка + клевер» и «timoфеевка + клевер + люцерна». Под посевом травосмеси «timoфеевка+люцерна» запасы гумуса в слое 20 см несколько снижаются – до 108,6 т/га, оставаясь на уровне средних показателей (рис. 2). Связано это с уменьшением показателей плотности сложения почв (с 0,87 до 0,82 г/см³) в данном варианте опыта.

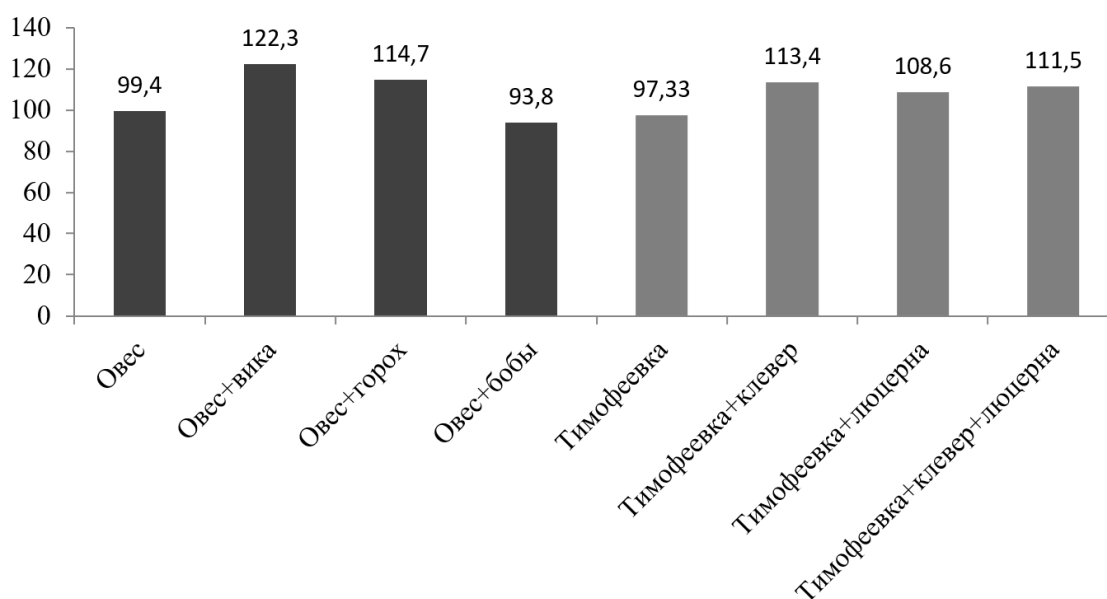


Рис. 2. Запасы гумуса в агротемногумусовых почвах в условиях фитомелиоративного опыта: по оси абсцисс – варианты опыта; по оси ординат – запасы гумуса, т/га / Fig. 2. Humus reserves in Luvic Albic Stagnosol (Loamic, Aric) under conditions of phytomeliorative experiment: on the abscissa axis - variants of the experiment; on the ordinat axis - humus stock, t/ha

В вариантах «овес + бобы» и «тимофеевка + клевер + люцерна» установлено увеличение содержания гумуса после посева трав с 5,3 до 5,5 % и с 5,9 до 6,4 % соответственно, что явно указывает на позитивное влияние посева травосмесей на плодородие почв.

Различия в содержании гумуса подтверждались данными оптических показателей почв – интегральным отражением (R). Согласно полученным данным, более высокие значения R свойственны вариантам опыта с посевом однолетних трав и их травосмесей: овес – 27,6; овес + вика – 27,3; овес + горох – 27,2; овес + бобы – 27,1 %. Связь между содержанием гумуса и интегральным отражением имела обратный характер. Коэффициент корреляции (r) составил –0,75.

В вариантах опыта с посевами травосмесей бобовых и многолетних трав, в связи с большим содержанием гумуса (от 6,4 до 6,6 %) в горизонте PU, интегральное отражение снижалось и составило в вариантах опыта: «тимофеевка» – 26,8 %; «тимофеевка + клевер» – 27,3; «тимофеевка + люцерна» – 25,1; «тимофеевка + клевер + люцерна» – 25,1 %. Для корреляционной пары Г-R значения r составили –0,41. Снижение степени выраженности связи, на наш взгляд, обусловлено избыточным переувлажнением почв, приводящим к уменьшению параметров R [19].

Наряду с изучением физико-химических параметров почв в условиях полевого опыта проведены исследования микробиологической активности почв. Степень обогащенности почв каталазой (Ка) достигала в основном средних показателей. Более высокие значения Ка были свойственны горизонту PU со средними показателями содержания гумуса (тимофеевка + люцерна). Средние значения Ка зафиксированы на варианте с посевами травосмеси «тимофеевка + люцерна» (табл. 1).

Установлено, что из всех вариантов в однолетнем фитомелиоративном опыте наибольшей биогенностью отличался вариант «овес + вика» (табл. 2). В составе микрофлоры доминируют бактерии, использующие для своей жизнедеятельности минеральные формы азота, что характерно и для других вариантов опыта. Вариант «овес + вика» отличался высокой численностью аммонифицирующих микроорганизмов (среда МПА), участвующих в разложении азотсодержащих органических соединений. Количество олигонитрофилов во всех вариантах опыта отличалось незначительно. Наименьшая биогенность свойственна варианту с посевами овса. Низкой численностью аммонифицирующих микроорганизмов отличался вариант «овес + горох».

Таблица 1 / Table 1

Каталазная активность (Ка) в горизонте PU агротёмногумусовых подбелов глеевых в условиях полевого опыта с посевом различных фитомелиорантов / Catalase activity (Ca) in the PU horizon of Luvic Albic Stagnosol (Loamic, Aric) under the conditions of a field experiment with the sowing of various phytomeliorants

Вариант опыта	Ка, млО ₂ /1 мин/1 г почвы
Однолетние культуры и их травосмеси с бобовыми травами	
Овес (контроль)	2,7 ±0,13
Овес + вика	4,4 ±0,20
Овес + горох	3,8 ±0,19
Овес + бобы	2,9 ±0,10
Многолетние культуры и их травосмеси с бобовыми травами	
Тимофеевка (контроль)	3,5 ±0,16
Тимофеевка + клевер	2,9 ±0,14
Тимофеевка + люцерна	4,7 ±0,20
Тимофеевка + клевер + люцерна	3,6 ±0,17

Таблица 2 / Table 2

**Микрофлора горизонта PU агротемногумусовых подбелов в условиях фитомелиоративного опыта
/ Microflora of the PU horizon of Luvic Albic Stagnosol (Loamic, Aric) under conditions
of phytomeliorative experiment**

Вариант опыта	Аммонификаторы на МПА	Грибы на среде Чапека	Микроорганизмы на КАА		Олигонитрофилы на среде Эшби	Биогенность	Коэффициент минерализации Мишустина
			Бактерии	Актиномицеты			
	тыс. КОЕ						
Однолетние травы и их травосмеси							
Овес (контроль)	5000	85	12950	150	9800	27985	2,6
Овес + вика	10500	115	21200	Не обн.	11650	43465	2,0
Овес + горох	4350	125	19500	200	12950	37125	4,5
Овес + бобы	7600	80	17100	100	11200	36080	2,3
Многолетние травы и травосмеси							
Тимофеевка (контроль)	9900	95	16500	200	10400	37095	1,7
Тимофеевка + клевер	6700	120	14900	100	12900	34720	2,2
Тимофеевка + люцерна	7450	120	19350	100	11350	38370	2,6
Тимофеевка + Клевер + люцерна	30500	75	80600	400	42800	154375	2,6

В многолетнем фитомелиоративном опыте наибольшая биогенность свойственна варианту «timoфеевка + клевер + люцерна». Это, на наш взгляд, обусловлено значительным поступлением азотсодержащих органических соединений за счет посева бобовых трав. Более низкие показатели биогенности установлены в варианте «timoфеевка + клевер». В составе микрофлоры всех вариантов опыта доминируют микроорганизмы, использующие минеральные формы азота (среда КАА). Наиболее высокая численность аммонификаторов отмечена в вариантах «timoфеевка» и «timoфеевка + клевер + люцерна». Судя по содержанию аммонификаторов в варианте «timoфеевка» относительно других групп микроорганизмов, здесь активно протекают процессы минерализации органического вещества, что подтверждается более низкими значениями коэффициента Мишустина.

Наряду с исследованием органического вещества и микрофлоры почв проведены исследования по изучению их микроэлементного состава. При сравнении уровня содержания валовых форм микроэлементов в верхнем горизонте исследованных почв со значениями российских кларковых концентраций [24] очевидно, что содержание большинства исследованных элементов превышает кларковую величину. Наибольшее превышение отмечено для Cu, Pb (до 3,4 раза выше величины российского кларка) и Co (до 2,2 раза). Содержание валовых форм Cr и Mo находится в пределах российских кларковых значений и близко к оптимальной величине.

Концентрация валовых форм Zn в верхнем горизонте исследованных почв большинства вариантов опыта незначительно превышает российский кларк, за исключением почв варианта опыта «timoфеевка + клевер», на котором для Zn отмечено 1,7-кратное превышение российского кларкового значения. Верхний горизонт почвы данного варианта опыта также характеризуется максимальным уровнем содержания Cu и Pb. Содержание Ni в опытных образцах почв всех вариантов опыта до 2,1 раза ниже величины российских кларковых концентраций (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Содержание микроэлементов в горизонте PU в условиях фитомелиоративного опыта, мг/кг почвы
/ The content of microelements in the PU horizon under the conditions of the phytomeliorative experiment,
mg/kg of soil**

Вариант опыта	Микроэлементы						
	Cr	Co	Cu	Zn	Mo	Pb	Ni
Овес (контроль)	86,1±4,3	18,8±0,94	41,0±2,00	57,0±2,85	2,8±0,12	11,4±0,57	26,5±1,32
Овес + вика	91,0±4,55	21,6±1,08	46,9±2,34	61,8±3,09	3,0±0,15	23,6±1,18	25,0±1,25
Овес + горох	92,1±4,60	21,2±1,06	59,1±2,95	62,5±3,12	2,9±0,14	30,7±1,53	35,9±1,79
Овес + бобы	89,2±4,46	22,0±1,1	43,0±2,15	66,9±3,34	3,0±0,15	11,1±0,55	28,2±1,41
Многолетние травы и их травосмеси с бобовыми культурами							
Тимофеевка (контроль)	86,6±4,30	15,3±0,76	55,1±2,75	61,3±3,06	2,9±0,14	31,5±1,57	29,2±1,46
Тимофеевка + клевер	87,0±4,40	17,2±0,86	62,1±3,10	89,4±4,47	2,9±0,14	34,2±1,71	18,5±0,92
Тимофеевка + люцерна	87,9±4,39	17,6±0,88	59,6±2,98	59,6±2,98	2,9±0,14	34,5±1,72	23,5±1,17
Тимофеевка + клевер + люцерна	86,1±4,30	18,8±0,94	41,0±2,05	57,0±2,85	2,8±0,13	11,4±0,57	26,5±1,32
Кларк для почв России [24]	83,0	10,0	20,0	50,0	2,6	10,0	40,0
Кларк для пахотных почв региона [25]	66,0	22,0	20,0	70,0	1,6	32,0	46,0

При сопоставлении с региональными кларковыми значениями [25] установлена несбалансированность микроэлементного состава исследованных образцов верхнего горизонта почв. К элементам, находящимся в недостаточном количестве, относится Ni. Содержание Cr, Mo и Cu в 1,5–3 раза превышает региональный кларковый уровень. Содержание Co, Zn и Pb варьирует в почвах разных вариантов опыта, и в одних случаях оно меньше кларковой величины или находится на уровне, а в других незначительно превышает уровень кларка.

Содержание Cr и Mo в пахотных горизонтах исследованных вариантов опыта варьировало незначительно, указывая на отсутствие значимого влияния различных комбинаций посева трав на изменение содержания данных элементов в почве. При добавлении в состав фитомелиорантов бобовых растений отмечено незначительное увеличение содержания в почве Co. Одной из причин увеличения содержания может являться участие Co в процессах активизации ферментов белкового обмена и накопление Co в клубеньках бобовых культур [26]. По сравнению с контрольными вариантами опыта в почвах вариантов «овес + бобовые культуры» отмечено увеличение содержания Ni, Cu и Zn, что может быть частично обосновано участием элементов в процессах связывания атмосферного азота бобовыми культурами. Схожая тенденция обнаружена в отношении Cu и Zn в отдельных вариантах опыта с посевом тимофеевки. Наибольшее увеличение содержания Cu и Zn отмечено для варианта «тимофеевка+клевер». В почвах вариантов опыта с посевом овса и добавлением вики и гороха зафиксировано значительное увеличение содержания валовых форм Pb (до 2,7 раза по сравнению с содержанием элемента в контрольном варианте). Также незначительное увеличение содержания Pb отмечается в почвах варианта опыта «тимофеевка + клевер» и «тимофеевка + люцерна». Для варианта опыта «тимофеевка + клевер + люцерна» отмечено значительное снижение содержания Cu и Pb, вероятно, это связано с усилением выноса элементов вегетативной массой растений.

Выводы

1. Гумусообразование в исследуемых почвах протекало в основном в условиях слабокислой реакции среды. Почвы средне обеспечены подвижными формами калия и фосфора, что снижает необходимость применения фосфор- и калийсодержащих удобрений.

2. Посев бобовых трав с однолетними и многолетними культурами способствовал активизации процессов гумусонакопления, увеличению биогенности и каталазной активности почв. На варианте опыта с посевами однолетних культур и их травосмесей с бобовыми травами наиболее благоприятные условия для процессов гумусонакопления складывались в варианте «овес + вика» (5,8 %). В посевах многолетних трав большее содержание гумуса отмечено в вариантах «тимофеевка + клевер» (6,6 %) и «тимофеевка + клевер + люцерна» (6,5 %). Установлены достоверно значимые различия с контролем. Значения t-критерия Стьюдента составили 3,61; 3,28; 3,81.

3. Различия в содержании гумуса подтверждались данными оптических показателей почв (интегральное отражение). Коэффициент корреляции (r) между содержанием гумуса и интегральным отражением составил $-0,75$. Это позволяет использовать показатели интегрального отражения для мониторинга изменения содержания гумуса в почвах с посевами различных фитомелиорантов. При этом следует учесть, что переувлажнение почв вносит свои коррективы и способствует снижению параметров R. Это отражается на связи между содержанием гумуса и интегральным отражением.

4. Исследованиями микрофлоры почв установлено, что во всех исследуемых вариантах опыта активно протекают процессы иммобилизации азота. В опыте с посевом однолетних трав наиболее высокая численность аммонифицирующих микроорганизмов зафиксирована для варианта «овес+вика». Тогда как в опыте с посевами многолетних трав наибольшим количеством аммонификаторов отличался вариант «тимофеевка+клевер+люцерна», что свидетельствовало об активизации процессов разложения органического вещества.

5. Выявлена несбалансированность микроэлементного состава исследованных почв. Установлено превышение регионального кларкового уровня по содержанию валовых форм Сг и Мо, но находящихся в пределах российских кларковых значений. В почвах отдельных вариантов опыта установлено превышение регионального кларкового уровня содержания валовых форм Рв. Использование различных комбинаций фитомелиорантов сопровождалось варьированием содержания микроэлементов в почвах. Добавление бобовых культур в посев овса сопровождалось увеличением содержания в почвах Со, Ni, Cu и Zn. Увеличение содержания Cu и Zn также отмечено в почвах отдельных вариантов опыта с посевом тимофеевки.

Список источников

1. Щапова Л.Н., Пуртова Л.Н., Киселева И.В. Микрофлора, ферментативная активность и показатели гумусного состояния агротемногумусовых подбелов в условиях фитомелиоративного опыта // Региональные проблемы. 2019. № 3. С. 38–44.
2. Suyundukov Ya.T., Mirkin B.M., Abdullin M.R., Sal'manova E.F., Hasanova G.R. The effect of phytoamelioration on the fertility of chernozems in the Trans-Ural part of Bashkiria // Eurasian Soil Science. 2007. Vol. 40, № 10. P. 1087–1094.
3. Сагалбеков У.М., Сагалбеков Е.У., Кусанова М.Е. Агрофизические показатели черноземов обыкновенных под многолетними травами (Северный Казахстан) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1234–1238. Doi: 10.7868/S0032180X13100110.
4. Thori T., Burke I C., Lauenroth W.K., Coffin D.P. Effect of cultivation and abandonment of soil on soil organic matter in Northeastern Colorado // Soil Sci. Soc. America J. 1995. Vol. 59, № 4. P. 1112–1119.
5. Евсеев В.В. Микробиологическая активность чернозема выщелоченного в зернопаровом и кормовом севооборотах лесостепной зоны Зауралья // Аграр. вестн. Урала. 2005. № 1 (25). С. 54–56.
6. Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Тимофеева Я.О., Емельянов А.Н., Тимошинов Р.В. Изменение содержания гумуса и биологической активности агротемногумусовых подбелов при различных агротехнических приемах обработки почв // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 3. С. 139–150. Doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-139-150.
7. Суюндуков Я.Т., Хасанова Р.Ф., Сальманова Э.Ф. Фитомелиоративный способ восстановления свойств почв степных экосистем // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2014. № 6 (167). С. 144–147.
8. Kursakova V.S. The effect of perennial herbs of the physical properties of saline soil // Eurasian Soil Science. 2010. Vol. 39 (7). P. 748–752.
9. Хавкина Н.В. Гумусообразование и трансформация органического вещества в условиях переменного почвообразования. Уссурийск: Изд-во ПГСХА, 2004. 270 с.
10. Иншакова С.Н., Емельянов А.Н. Использование фитомелиорантов в земледелии Приморского края. Уссурийск: Изд-во Приморская ГСХА, 2016. 125 с.

11. Шестеркин Д.Г. Эффективность фитомелиорации в повышении плодородия чернозёма южного и урожайности зерновых культур в Поволжье: автореф. дис. ... канд. с.-х. н. Саратов, 2013. 18 с.
12. Классификация и диагностика почв России / авт. и сост.: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
13. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
14. IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: Food and Agriculture Organization, 2014.
15. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
16. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
17. Ознобихин В.И., Синельников Э.П. Характеристика основных свойств почв Приморья и пути их рационального использования. Уссурийск: ПСХИ, 1985. 72 с.
18. Агрофизические методы исследования почв. М.: Наука, 1966. 256 с.
19. Михайлова Н.А., Пуртова Л.Н. Оптико-энергетические методы в экологии почв. Владивосток: Дальнаука, 2005. 81 с.
20. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под общ. ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 303 с.
21. М-02-0604-2007. Методика выполнения измерений массовой доли кремния, кальция, титана, ванадия, хрома, бария, марганца, железа, никеля, меди, цинка, мышьяка, стронция, свинца, циркония, молибдена в порошковых пробах почв и донных отложений рентгеноспектральным методом с применением энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектрометров типа EDX фирмы Shimadzu. СПб., 2007. 17 с.
22. Пуртова Л.Н., Костенков Н.М. Содержание органического углерода и энергозапасы в почвах природных и агрогенных ландшафтов юга Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2009. 124 с.
23. Степанько А.А. Агрогеографическая оценка земельных ресурсов и их использование в районах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1992. 115 с.
24. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
25. Голов В.И. Микроэлементный состав почв Приморья // Характеристика агроземов Приморья. Уссурийск: Изд-во ПГСХА, 2002. С. 76–84.
26. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2011. 368 с.

References

1. Shchapova L.N., Purtova L.N., Kiseleva I.V. Microflora, enzymatic activity and indicators of the humus state of agro-dark-humus podbels in the conditions of phytomeliorative experiment. *Regional'nye problemy = Regional Problems*. 2019;(3):38-44. (In Russ.).
2. Suyundukov Ya.T., Mirkin B.M., Abdullin M.R., Sal'manova E.F., Hasanova G.R. The effect of phytoamelioration on the fertility of chernozems in the Trans-Ural part of Bashkiria. *Eurasian Soil Science*. 2007;40(10):1087-1094.
3. Sagalbekov U.M., Sagalbekov E.U., Kusanova M.E. Agrophysical indicators of ordinary chernozems under perennial grasses (Northern Kazakhstan). *Pochvovedenie = Eurasian Soil Sci*. 2013;(10):1234-1238. (In Russ.).
4. Thori T., Burkel C., Lauenroth W. K., Coffin D. P. Effect of cultivation and abandonment of soil on soil organic matter in Northeastern Colorado. *Soil Sci. Soc. America J*. 1995;59(4):1112-1119.
5. Evseev V.V. Microbiological activity of leached chernozem in grain-fallow and fodder crop rotations of the forest-steppe zone of the Trans-Urals. *Agrarnyi vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*. 2005;(1):54-56. (In Russ.).
6. Purtova L.N., Kiseleva I.V., Timofeeva Ya.O., Emelyanov A.N., Timoshinov R.V. Changes in the content of humus and the biological activity of agro-dark-humus underbelly under various agrotechnical methods of tillage *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):139-150, doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-139-150. (In Russ.).
7. Suyundukov Ya.T., Khasanova R.F., Salmanova E.F. Phytomeliorative method for restoring the properties of steppe ecosystem soils. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Orenburg State University*. 2014;(6):144-147. (In Russ.).
8. Kursakova V.S. The effect of perennial herbs of the physical properties of saline soil. *Eurasian Soil Science*. 2010;39(7):748-752.
9. Khavkina N. V. *Humus formation and transformation of organic matter under conditions of variable gley soil formation*. Ussuriysk: Primorsky State Agrarian Academy Press; 2004. 270 p. (In Russ.).

10. Inshakova S.N., Emelyanov A.N. *The use of phytomeliorants in agriculture of Primorsky region*. Ussuriysk: Primorsky State Agrarian Academy Press; 2016. 125 p. (In Russ.).
11. Shesterkin D. G. *Efficiency of phytomelioration in increasing the fertility of southern chernozem and the yield of grain crops in the Volga region*. Dissertation thesis. Saratov, 2013. 18 p. (In Russ.).
12. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimov M.I., comp. *Classification and diagnostics of Russian soils*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).
13. Ivanov G.I. *Soil formation in the south of the Far East*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 200 p. (In Russ.).
14. *IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, World Soil Resources Reports No. 106*. Rome: Food and Agriculture Organization Press; 2014.
15. Arinushkina E. V. *Guidelines for the chemical analysis of soils*. Moscow: Moscow State University Press; 1970. 487 p. (In Russ.).
16. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S. Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Sci.* 2004;37(8):798-805. (In Russ.).
17. Oznobikhin V.I., Sinelnikov E.P. *Characterization of the main properties of the soils of Primorye and ways of their rational use*. Ussuriysk: Primorsky State Agrarian Institute Press; 1985. 72 p. (In Russ.).
18. *Agrophysical methods of soil research*. Moscow: Nauka Publ.; 1966. 256 p. (In Russ.).
19. Mikhailova N.A., Purtova L.N. *Optical-energetic methods in soil ecology*. Vladivostok: Dal'nauka Publ.; 2005. 81 p. (In Russ.).
20. Zvyagintsev D.G., ed. *Methods of soil microbiology and biochemistry*. Moscow: Moscow State University Press; 1991. 303 p. (In Russ.).
21. *M-02-0604-2007. Method for measuring the mass fraction of silicon, calcium, titanium, vanadium, chromium, barium, manganese, iron, nickel, copper, zinc, arsenic, strontium, lead, zirconium, molybdenum, in powder samples soils and bottom sediments by X-ray spectral method using energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometers of the EDX type from Shimadzu*. St. Petersburg, 2007. 17 p. (In Russ.).
22. Purtova L.N., Kostenkov N.M. *Content of organic natural and energy reserves in soils and agrogenic landscapes of the south of the Russian Far East*. Vladivostok: Dal'nauka Publ.; 2009. 124 p. (In Russ.).
23. Stepanko A.A. *Agrogeographic assessment of land resources and their use in the regions of the Far East*. Vladivostok: Dal'nauka Publ.; 1992. 115 p. (In Russ.).
24. Vinogradov A.P. *Geochemistry of rare and trace elements in soils*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Press; 1957. 238 p. (In Russ.).
25. Golov V.I. Microelement composition of the soils of Primorye. *Characteristics of agrozems of Primorye*. Ussuriysk: Primorsky State Agrarian Academy Press; 2002:76-84. (In Russ.).
26. Bityutsky N.P. *Microelements of higher plants*. St. Petersburg: St. Petersburg University Press; 2011. 368 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Людмила Николаевна Пуртова – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвоведения и экологии почв.

Ирина Владимировна Киселева – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвоведения и экологии почв.

Яна Олеговна Тимофеева – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией почвоведения и экологии почв.

Алексей Николаевич Емельянов – кандидат сельскохозяйственных наук, директор.

Наталья Леонидовна Клочкова – младший научный сотрудник отдела полевого и лугопастбищного корموпроизводства.

Information about the authors

Lyudmila N. Purtova - Doctor of Science (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Soil Science and Soil Ecology.

Irina V. Kiseleva - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Soil Science and Soil Ecology.

Yana O. Timofeeva - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Head of Laboratory of Soil Science and Soil Ecology.

Alexey N. Emelyanov - Candidate of Science (Agriculture), Director.

Natalia L. Klochkova - Junior Researcher, Department of Field and Grassland Forage Production.

*Статья поступила в редакцию 05.09.2023; одобрена после рецензирования 14.10.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 05.09.2023; approved after reviewing 14.10.2023; accepted for publication 19.02.2024.*

Научная статья

УДК 57.044; 631.46

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-162-168

ОЦЕНКА ЗДОРОВЬЯ ПОЧВЫ РЕКУЛЬТИВИРОВАННОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ФИТОТОКСИЧНОСТИ

Е.С. Храпай¹, А.А. Кузина², С.И. Колесников³✉, Т.В. Минникова⁴, К.Ш. Казеев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹katerinap1996@mail.ru

²ankuzin@sfnu.ru

³kolesnikov@sfnu.ru✉

⁴tminnikova@sfnu.ru

⁵kazeev@sfnu.ru

Аннотация. Процессы добычи и обогащения металлических руд сопровождаются образованием отходов, содержащих загрязняющие вещества, в том числе тяжелые металлы. Для уменьшения влияния на окружающую среду производят рекультивацию после вывода из эксплуатации хвостохранилища, в котором предприятия хранят отходы. В данном исследовании рассмотрены фитотоксические свойства почвы рекультивированного хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината. Для оценки здоровья почвы после рекультивации использовали семена редиса (*Raphanus sativus* L. var. *Radicula*). Было установлено, что почвы рекультивированного хвостохранилища имеют удовлетворительный уровень фитотоксических показателей, из чего можно сделать вывод о качественной рекультивации.

Ключевые слова: хвостохранилище, рекультивация, химическое загрязнение, тяжелые металлы, показатели всхожести, показатели интенсивности начального роста

Для цитирования: Храпай Е.С., Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Казеев К.Ш. Оценка здоровья почвы рекультивированного хвостохранилища по показателям фитотоксичности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 162–168.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-74-01071, <https://rscf.ru/project/23-74-01071/>, в Южном федеральном университете.

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

Original article

ASSESSMENT OF THE SOIL HEALTH OF A RECLAIMED TAILINGS DUMP BY PHYTOTOXICITY INDICATORS

E.S. Khrapay¹, A.A. Kuzina², S.I. Kolesnikov³✉, T.V. Minnikova⁴, K.Sh. Kazeev⁵

^{1, 2, 3, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹katerinap1996@mail.ru

²ankuzin@sfnu.ru

³kolesnikov@sfnu.ru✉

⁴tminnikova@sfnu.ru

⁵kazeev@sfnu.ru

© Храпай Е.С., Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Казеев К.Ш., 2024

Abstract. *The processes of extraction and enrichment of metal ores are accompanied by the formation of waste containing pollutants, including heavy metals. To reduce the impact on the environment, after decommissioning of the tailings dump, in which enterprises store waste, reclamation is carried out. In this study, the phytotoxic properties of the soil of the reclaimed tailings pond of the Urup mining and processing plant, using radish seeds (*Raphanus sativus* L. var. *Radicula*). As a result, it was found that the soils of the reclaimed tailing dump have a satisfactory level of phytotoxic indicators, from which it can be concluded that high-quality reclamation.*

Keywords: *tailings dump, reclamation, chemical pollution, heavy metals, germination rates, indicators of the intensity of initial growth*

For citation: *Khrapay E.S., Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh. Assessment of the Soil Health of a Reclaimed Tailings Dump by Phytotoxicity Indicators. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2024;(1):162-168. (In Russ.).*

Acknowledgments: *the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-74-01071, <https://rscf.ru/project/23-74-01071/>, 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).

Влияние добычи и обогащения руды на экологические показатели широко исследуется как в нашей стране [1–3], так и иностранными учеными [4–8]. Большинство ученых связывает токсичность подобных производств с содержанием в отходах тяжелых металлов (медь (Cu), цинк (Zn), свинец (Pb), никель (Ni) и др.) [9], которые крайне неблагоприятно воздействуют на почвенную экосистему [10, 11]. Загрязняющие агенты соединяются с белковыми молекулами, блокируя тем самым обменные процессы. Чаще всего почвенные показатели реагируют на присутствие тяжелых металлов снижением длины корней и побегов растительных тест-объектов [11–14], изменением численности и структуры бактериального сообщества [15, 16], снижением активности различных почвенных ферментов [14, 17, 18].

Рекультивация хвостохранилища производится после его вывода из эксплуатации для изоляции и уменьшения загрязнения, восстановления биологических свойств нарушенных земель и здоровья почвы [19].

Хвостохранилище Урупского горно-обогатительного комбината (ГОК) функционировало около 29 лет. Рекультивационные работы проводили с 2019 по 2021 г. в рамках федерального проекта «Чистая страна» и национального проекта «Экология».

Важной характеристикой здоровья почвы является благоприятная среда для произрастания растений, что можно оценить по показателям фитотоксичности почв.

Цель работы – оценить здоровье почвы рекультивированного хвостохранилища (ПРХ) Урупского горно-обогатительного комбината по показателям фитотоксичности.

Материалы и методы

Объект исследования – ПРХ Урупского ГОК (Карачаево-Черкесская Республика, Урупский район).

Образцы почв отбирали в 8 точках из верхнего слоя почвы (0–10 см). ПРХ характеризуются высоким содержанием гумуса (4,5–11,5 %), плотным сложением и крупнокомковатой структурой. Картосхема отбора почв представлена на рисунке.

Сравнивали фитотоксические свойства почв рекультивированной и контрольной (фоновой). В качестве контроля использовали фоновые для данной территории горно-луговые черноземовидные почвы. Отбор образцов фоновой почвы производили на расстоянии 3 км от рекультивированного хвостохранилища. Фоновая почва характеризуется высоким содержанием гумуса (12 %), рыхлым сложением, ореховатой структурой.



Картограмма отбора почвенных образцов на рекультивированном хвостохранилище Урупского ГОК / Map of soil sampling at the reclaimed tailings dump of the Urupsky Mining and Processing Plant

Был проведен анализ на фитотоксические свойства почвы согласно общепринятым методам [20]. В качестве тест-объекта использовали семена редиса *Raphanus sativus L. var. radicula* сорта Жара.

Они имеют малое количество питательных веществ, следовательно, сильнее подвержены влиянию загрязнения. В чашки Петри были помещены по 50 г почвы. Ее увлажняли до 70–80 % влагоемкости, высаживали по 25 семян тест-объекта. Подготовленные образцы в 2-кратной повторности помещали в климатическую камеру для поддержания постоянных условий роста семян (температура, освещенность и влажность).

Фитотоксические свойства почвы оценивали по показателям всхожести семян (всхожесть, энергия, дружность и скорость прорастания) и интенсивности начального роста растений (длина корней и побегов редиса) [20].

Всхожесть семян – доля проросших семян за время прорастания от общего количества. Энергия прорастания – процент всхожести семян на третий день проращивания от количества всех семян. Дружность прорастания (Д) – средний процент проросших семян за один день: $D = \frac{F}{N}$, где F – полная всхожесть; N – число суток прорастания. Скорость прорастания (S) – сумма средних чисел семян, проросших за каждые сутки.

$$S = \sum_{i=1}^a \frac{a_i}{i}, \text{ где } a - \text{ число семян, проросших за } i\text{-е сут.}$$

Статистическую обработку данных производили с помощью программы Statistica 12.0 с применением непараметрического U-критерия Манна – Уитни (использование параметрических критериев для исследования состояния почвы невозможно, так как распределение совокупностей отличается от нормального) [21]. Критерий Манна – Уитни используется для сравнения двух независимых выборок по уровню количественно измеренного признака [22]: $U = n_k \cdot n_e + \frac{n(n+1)}{2} - T$, где n_k – объем контрольной выборки; n_e – объем исследуемой выборки; n – объем выборки, имеющей большую ранговую сумму; T – большая сумма рангов из контрольной и исследуемой выборок.

Для определения ранговой суммы (T) составляли ранжированный ряд для каждой выборки и определяли сумму рангов для контрольной и исследуемой выборок. По таблице для избранного уровня статистической доверительной вероятности находили критическое значение ($U_{кр}$) при заданной численности выборок. Сравнили полученные результаты с критическим значением. Достоверность различий между выборками тем выше, чем меньше значение полученного критерия. Если $U > U_{кр}$, то достоверность различий между уровнем признака в рассматриваемых выборках не является значимой. Если $U \leq U_{кр}$, то различия признака между выборками статистически достоверны.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения фитотоксических свойств ПРХ представлены в таблице.

**Фитотоксические показатели почвы рекультивированного полигона /
Phytotoxic indicators of the soil of the reclaimed landfill**

Точки отбора и статистические характеристики	Показатели всхожести семян				Показатели интенсивности начального роста растений	
	Всхожесть семян редиса, %	Энергия прорастания семян редиса, %	Дружность прорастания семян редиса, %	Скорость прорастания семян редиса	Длина корней редиса, мм	Длина побегов редиса, мм
Контроль (фон) 1	58,8	38,3	8,39	15,4	51,4	50,2
Контроль (фон) 2	56,3	34,7	8,00	13,5	43,1	40,7
Контроль (фон) 3	60,0	37,1	8,60	14,4	45,3	43,0
Среднее значение	58,4	36,7	8,33	14,4	46,6	44,6
Максимальное значение	60,0	38,3	8,60	15,4	51,4	50,2
Минимальное значение	56,3	34,7	8,00	13,5	43,1	40,7
Дисперсия	2,38	2,2	0,06	0,60	12	16,4
Среднеквадратическое отклонение	1,09	1,06	0,18	0,55	2,48	2,86
Стандартная ошибка	0,77	0,75	0,12	0,39	1,76	2,02
Коэффициент вариации	1,87	2,88	2,11	3,80	5,33	6,41
Точка 1	48,8	28,8	6,25	10,6	40,7	43,0
Точка 2	48,8	30,1	6,25	10,7	46,5	37,2
Точка 3	53,8	36,0	6,96	11,7	39,5	35,9
Точка 4	45,0	27,8	6,43	10,8	38,5	31,1
Точка 5	56,3	34,7	8,04	13,5	44,5	40,3
Точка 6	59,3	37,1	8,57	14,4	48,6	41,5
Точка 7	58,9	38,6	8,93	15,1	47,2	45,4
Точка 8	61,9	39,7	9,64	16,3	53,7	48,0
Среднее значение	54,1	34,2	7,6	12,9	44,9	40,3
Максимальное значение	61,9	39,7	9,6	16,3	53,7	48,0
Минимальное значение	45,0	27,8	6,3	10,6	38,5	31,1
Дисперсия	36,4	21,9	1,8	5,0	26,7	29,7
Среднеквадратическое отклонение	2,3	1,8	0,5	0,8	2,0	2,1
Стандартная ошибка	0,9	0,7	0,2	0,3	0,7	0,8
Коэффициент вариации	4,2	5,2	6,6	6,6	4,3	5,1
Критерий Манна – Уитни	7,5	9	9	7	10	7

Всхожесть семян на ПРХ в точках 6, 7 и 8 больше, чем на фоновой почве. Минимальное значение всхожести ПРХ в точке 4 меньше среднего фонового на 23 %, в точках 1, 2, 3, 5 снижение на 4–16 %.

Энергия прорастания уменьшается по сравнению со средним контрольным результатом для точек 1–5. В точках 6–8 значения большего среднего фонового. Минимальное значение (в точке 4) меньше среднего фонового на 24 %, для остальных проб (1, 2, 3, 5) характерно снижение на 5–22 %.

Значения дружности прорастания семян на ПРХ больше контрольных в точках 6, 7, 8. В остальных точках отбора происходит уменьшение значений по сравнению со средним фоновым на 6–26 %.

Показатели скорости прорастания в пробах 1–5, взятых с ПРХ, меньше среднего контрольного на 6–39 %. Пробы 6–8 показывают результаты больше среднего фонового.

Показатели интенсивности начального роста растений на ПРХ ниже, чем те же показатели на фоновых почвах. Длина проросших корней больше, чем средний фоновый результат, в точках 6–8, длина корней на остальных пробах (1–5) уменьшается на 13–17 %. Длина побегов проросших семян редиса точек 7, 8 больше среднего фонового, для остальных характерно уменьшение на 5–40 %.

При сравнении полученных данных критерия Манна – Уитни с критическими при уровне значимости 5 % ($U_{кр}=2$) все полученные результаты больше критического ($U > U_{кр}$). Например, критерий Манна – Уитни между показателями всхожести контрольной (фоновой) и ПРХ составляет 7,5 ($U=7,5$), а критическое значение – 2 ($U_{кр}=2$). Полученный результат больше критического значения ($U > U_{кр}$), следовательно, достоверные различия по этому показателю между ПРХ и фоновой горно-луговой черноземовидной почвой отсутствуют.

Некоторые показатели фитотоксичности в ряде точек ПРХ превосходят значения в фоновой почве. Это точки 6, 7, 8 для показателей всхожести и дружности прорастания. В точке 8 длина корней проросших семян выше контрольной.

В целом результаты исследования фитотоксичности ПРХ несколько ниже фоновых. Это обусловлено меньшей структурностью, большей плотностью, меньшим содержанием гумуса в ПРХ по сравнению с фоновой почвой.

Полученные результаты свидетельствуют о благоприятном состоянии (здоровье) ПРХ для развития растений и качественно проведённой рекультивации.

Заключение

Сравнение фитотоксических показателей фоновой горно-луговой черноземовидной почвы и ПРХ Урупского ГОК показало несколько менее благоприятные условия для роста и развития растений в последней. Это обусловлено меньшей структурностью, большей плотностью и меньшим содержанием гумуса в ПРХ по сравнению с фоновой почвой.

Рекультивационные работы на данном участке показывают, что ПРХ уже благоприятна для роста и развития растений, что в ближайшие годы будет способствовать улучшению структурности, снижению плотности и увеличению содержания гумуса, а следовательно, улучшению здоровья почв.

Список источников

1. Алборов И.Д., Тедеева Ф.Г., Бурдзиева О.Г. Экологические аспекты сохранения техногенных месторождений цветных металлов на Северном Кавказе // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13, № 2. С. 265–272. Doi: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-265-272.
2. Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Тедеева Ф.Г., Гегелашвили М.В. Экологическая напряженность в зонах добычи цветных металлов на Северном Кавказе // Горн. информ.-аналит. бюл. 2020. № 11-1. С. 18–31. Doi: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-18-31.
3. Мощенко Д.И., Колесников С.И., Кузина А.А., Меженков А.А., Литвинов Ю. А. Разработка прогнозных картосхем нарушения экосистемных функций почв Центрального Предкавказья и Кавказа при их загрязнении разными концентрациями меди // Горн. информ.-аналит. бюл. 2023. № 5-1. С. 104–116. Doi: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_104.
4. Midhat L., Ouazzani N., Hejjaj A., Ouhammou A., Mandi L. Accumulation of heavy metals in metallophytes from three mining sites (Southern Centre Morocco) and evaluation of their phytoremediation potential // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2019. Vol. 169. P. 150–160.
5. Du Y., Chen L., Ding P., Liu L., He Q., Chen B., Duan Y. Different exposure profile of heavy metal and health risk between residents near a Pb-Zn mine and a Mn mine in Huayuan county, South China // Chemosphere. 2019. Vol. 216. P. 352–364.
6. Martin C.W. Trace metal concentrations along tributary streams of historically mined areas, Lower Lahn and Dill River basins, central Germany // Catena. 2019. Vol. 174. P. 174–183.
7. Kasimov N., Kosheleva N., Gunin P., Korlyakov I., Sorokina O., Timofeev I. State of the environment of urban and mining areas in the Selenga Transboundary River Basin (Mongolia Russia) // Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75. P. 1–20.
8. Yan C., Huang J., Cao C., Li R., Ma Y., Wang Y. Effects of PVP-coated silver nanoparticles on enzyme activity, bacterial and archaeal community structure and function in a yellow-brown loam soil // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. P. 8058–8070.
9. Менчинская О.В. Эколого-геохимические аспекты техногенного загрязнения металлургических центров: на примере Владикавказ: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 24 с.

10. Kushwaha A. Hans, N., Kumar S., Rani R. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. Vol. 147. P. 1035–1045.
11. Анореева И.В., Байбеков Р.Ф., Злобина М.В. Фиторемедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Природообустройство*. 2009. № 5. С. 5–10.
12. Неаман А., Янъез К. Фиторемедиация почв, загрязненных выбросами медеплавильного производства в Чили: результаты десятилетних исследований // *Почвоведение*. 2021. № 12. С. 1564–1572.
13. Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш. Оценка экотоксичности химических соединений серебра по показателям фитотоксичности чернозема // *АгроЭкоИнфо*. 2022. № 5. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/5/st_535.pdf. (дата обращения: 15.12.2022).
14. Kolesnikov S., Minnikova T., Kazeev K., Akimenko Y., Evstegneeva N. Assessment of the ecotoxicity of pollution by potentially toxic elements by biological indicators of haplic chernozem of Southern Russia (Rostov region) // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022. Vol. 233, № 1. P. 18.
15. Wang Y., Li J., Wei Y., Deng Z., Hao X., Li F. Linear models for describing relations between sensitive bacterial taxa and ecological risk from heavy metals in soils of coal mines in semi-arid region // *Applied Soil Ecology*. 2024. Vol. 193. P. 105122.
16. Wang X., Dai Z., Lin J., Zhao H., Yu H., Ma B., Xu J. Heavy metal contamination collapses trophic interactions in the soil microbial food web via bottom-up regulation // *Soil Biology and Biochemistry*. 2023. Vol. 184. P. 109058.
17. Gianfreda L., Rao M. A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: a review // *Enzyme and Microbial Technology*. 2004. Vol. 35, № 4. P. 339–354.
18. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // *Агрохимия*. 2020. № 3. С. 83–93.
19. Чибрик Т.С. Основы биологической рекультивации: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2002. 172 с.
20. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters // *Environ. Monit. Assess.* 2019. Vol. 191. P. 544. Doi: 10.1007/s10661-019-7718-3.
21. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // *Бюл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева*. 2020. № 102. С. 164–182.
22. Каллистова А.Ю., Сабреков А.Ф., Гончаров В.М., Пименов Н.В., Глаголев М.В. К вопросу об использовании статистического анализа при интерпретации результатов экспериментов в области экологической микробиологии // *Микробиология*. 2019. Т. 88, № 2. С. 230–239.

References

1. Alborov I.D., Tedeeva F.G., Burdzieva O.G. Ecological aspects of conservation of technogenic deposits of non-ferrous metals in the North Caucasus. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2021;13(2):265-272, doi: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-265-272. (In Russ.).
2. Alborov I.D., Burdzieva O.G., Tedeeva F.G., Gegelashvili M.V. Environmental tensions in non-ferrous metal mining zones in the North Caucasus. *Gorn. inform.-analit. byul. = Mining Information and Analytical Bulletin*. 2020;(11-1):18-31, doi: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-18-31. (In Russ.).
3. Moshchenko D.I., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Mezhenkov A.A., Litvinov Yu.A. Development of predictive cartograms of violations of ecosystem functions of soils of the Central Caucasus and the Caucasus when they are contaminated with different concentrations of copper. *Gorn. inform.-analit. byul. = Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023;(5-1):104-116, doi: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_104. (In Russ.).
4. Midhat L., Ouazzani N., Hejjaj A., Ouhammou A., Mandi L. Accumulation of heavy metals in metallophytes from three mining sites (Southern Centre Morocco) and evaluation of their phytoremediation potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;169:150-160.
5. Du Y., Chen L., Ding P., Liu L., He Q., Chen B., Duan Y. Different exposure profile of heavy metal and health risk between residents near a Pb-Zn mine and a Mn mine in Huayuan county, South China. *Chemosphere*. 2019;216:352-364.
6. Martin C.W. Trace metal concentrations along tributary streams of historically mined areas, Lower Lahn and Dill River basins, central Germany. *Catena*. 2019;174:174-183.
7. Kasimov N., Kosheleva N., Gunin P., Korlyakov I., Sorokina O., Timofeev I. State of the environment of urban and mining areas in the Selenga Transboundary River Basin (Mongolia Russia). *Environmental Earth Sciences*. 2016;75:1-20.
8. Yan C., Huang J., Cao C., Li R., Ma Y., Wang Y. Effects of PVP-coated silver nanoparticles on enzyme activity, bacterial and archaeal community structure and function in a yellow-brown loam soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:8058-8070.

9. Menchinskaya O.V. *Ecological and geochemical aspects of technogenic pollution of metallurgical centers (on the example of Vladikavkaz)*. Dissertation Thesis. Moscow, 2004. 24 p. (In Russ.).
10. Kushwaha A., Hans N., Kumar S., Rani R. A critical review of speciation, mobilization and toxicity of lead in the soil-microbes-plants system and bioremediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018;147:1035-1045.
11. Andreeva I.V., Baibekov R.F., Zlobina M.V. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Prirodobustroistvo = Environmental Engineering*. 2009;(5):5-10. (In Russ.).
12. Neaman A., Yanez K. Phytoremediation of soils polluted by emissions from copper smelting in Chile: The results of ten years of research. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2021;(12):1564-1572. (In Russ.).
13. Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh. Assessment of ecotoxicity of chemical compounds of silver by indicators of phytotoxicity of chernozem. *AgroEcoInfo*. 2022;(5). Available from: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/5/st_535.pdf [Accessed 15th December 2022]. (In Russ.).
14. Kolesnikov S., Minnikova T., Kazeev K., Akimenko Yu., Evstegneeva N. Assessment of ecotoxicity of pollution with potentially toxic elements by biological indicators of haplic chernozem of the South of Russia (Rostov region). *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022;233(1):18.
15. Wang Y., Li J., Wei Y., Deng Z., Hao H., Li F. Linear models for describing relations between sensitive bacterial taxa and ecological risk from heavy metals in soils of coal mines in semi-arid region. *Applied Soil Ecology*. 2024;193:105122.
16. Wang X., Dai Z., Lin J., Zhao H., Yu H., Ma B., Xu J. Heavy metal contamination collapses trophic interactions in the soil microbial food web via bottom-up regulation. *Soil Biology and Biochemistry*. 2023;184:109058.
17. Gianfreda L., Rao M. A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: a review. *Enzyme and Microbial Technology*. 2004;35(4):339-354.
18. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Soil enzymes and soil pollution: biodegradation, bioremediation, bioindication. *Agrokimiya = Agrochemistry*. 2020;(3):83-93. (In Russ.).
19. Chibrik T. S. *Fundamentals of biological reclamation: textbook*. Yekaterinburg: Ural University Press; 2002. 172 p. (In Russ.).
20. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environ. Monit. Assess.* 2019;191:544, doi: 10.1007/s10661-019-7718-3.
21. Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L. Frequent inaccuracies and errors in the application of statistical methods in soil science. *Byul. Pochvennogo in-ta im. V.V. Dokuchaeva = Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*. 2020;(102):164-182. (In Russ.).
22. Kallistova A.Yu., Sabrekov A.F., Goncharov V.M., Pimenov N.V., Glagolev M.V. On the use of statistical analysis in the interpretation of experimental results in the field of environmental microbiology. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2019;88(2):230-239. (In Russ.).

Информация об авторах

Екатерина Сергеевна Храпай – студент, лаборант-исследователь, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Анна Андреевна Кузина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Сергей Ильич Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Татьяна Владимировна Минникова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Камиль Шагидуллович Казеев – доктор географических наук, профессор, директор Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

Ekaterina S. Khrapay - Student, Laboratory Researcher, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Anna A. Kuzina - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Sergey I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agricultural Sciences), Professor, Head of Department of Ecology and Nature Management, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Tatiana V. Minnikova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Kamil Sh. Kazeev - Doctor of Science (Geography), Professor, Director of the D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 29.09.2023; одобрена после рецензирования 14.10.2023; принята к публикации 19.02.2024.
The article was submitted 29.09.2023; approved after reviewing 14.10.2023; accepted for publication 19.02.2024.

ПАМЯТИ КОЛЛЕГИ IN MEMORY OF A COLLEAGUE

Персоналии

doi: 10.18522/1026-2237-2024-1-169-170

**ВИКТОР ИСИДОРОВИЧ ЛИТВИНЕНКО
(04.11.1940–25.01.2024)**

Personalities

**VICTOR ISIDOROVICH LITVINENKO
(04.11.1940–25.01.2024)**

25 января 2024 г. на 84-м году ушел из жизни Виктор Исидорович Литвиненко – один из старейших сотрудников редакции журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион».

Виктор Исидорович родился 4 ноября 1940 г. в селе Высочино Ростовской области, детство его пришлось на трудные годы Великой Отечественной войны и непростое послевоенное время. После окончания средней школы молодой человек заведовал сельской библиотекой, работал учителем начальных классов в местной школе и только после этого стал студентом Ростовского госуниверситета.

Еще будучи учащимся 5-го курса филфака, он был направлен на работу в университетское издательство (февраль 1968 г.). Первоначально трудился в должности ведущего редактора Издательства РГУ, с 1970 г. был переведён на должность зав. редотделом «Известия СКНЦ ВШ».

В 1995 г. Виктора Исидоровича пригласили на работу в журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» на должность редактора отдела. Ему было поручено редактировать серию Технических наук и осуществлять контроль над двумя другими сериями («Общественные науки» и «Естественные науки»), чем он и был занят в последнее время, т.е. 29 лет при общем стаже работы в университете – 56.

Имея солидный опыт редакторской работы, Виктор Исидорович снискал уважение и авторитет не только среди своих сотрудников, но и у многочисленных авторов, которым довелось с ним работать. Не раз приходилось ему слышать от них слова искренней благодарности за скрупулёзное внимание к их письменным трудам. Возможно, именно поэтому его, помимо основной работы в нашем журнале, приглашали сотрудничать в другие научные издания, выходящие в системе университетской периодики («Валеология», «Известия ЮФУ. Филологические науки» и др.).

В.И. Литвиненко известен и как историк-краевед. Многие годы своей жизни он посвятил работе с архивными материалами, собирая документальные сведения по истории населённых пунктов юго-восточного Приазовья, развитию народного просвещения и церковного строительства в этом регионе. Его работы по истории поселений южного Задонья, опирающиеся на первоисточники, публиковались в журнале «Филологический вестник РГУ», в Ростовской электронной газете (РЭЛГА). Эти публикации получили широкий отклик не только в нашей



стране, но и за рубежом, поскольку в них впервые в большом объеме были отражены документы, например, о поселениях колонистов – немцев и латышей. Многие годы с Виктором Исидоровичем переписывались читатели как нашей страны, так и зарубежные, в частности из Франции, Германии и США.

Материалы В.И. Литвиненко были использованы администрацией Азовского района при издании юбилейной книги «Земля, что пахнет хлебом». Помимо упомянутых выше публикаций, он является автором книг «Сёла Приазовья», «Расставанье с крепостным правом в Приазовье», положительно отмеченных научной общественностью.

К 70-летию Победы в Великой Отечественной войне он собрал огромный материал о судьбе воинов-земляков, вошедший в Книгу Памяти (объем свыше 40 п.л.). Несколько его очерков о письмах фронтовиков опубликовано в 2020 г. в томе «Незабываемые годы», вып. 10 (изданном Азовским городским советом ветеранов).

Работы В.И. Литвиненко по историческому краеведению не остались незамеченными – его имя занесено в «Донскую энциклопедию», на родине ему присвоено звание почётного гражданина, а районная администрация наградила его знаком «За заслуги перед Азовским районом».

Отдадим должное скромности нашего коллеги, его интеллигентности, доброжелательности, мягкому юмору, но вместе с тем ему были присущи в высшей степени чувство собственного достоинства, сильный характер и упорство.

Светлая память о замечательном профессионале и прекрасном человеке сохранится в сердцах сотрудников и коллег Виктора Исидоровича навсегда.

Скорбим и выражаем искренние соболезнования родным и близким.

Над номером работали: Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко

Подписано в печать 27.03.2024. Выход в свет 29.03.2024. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 19,99. Уч.-изд. л. 22,44. Тираж 250 экз. Заказ № 9468.

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

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

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

Magazine released: L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, N.G. Shatravkina, M.S. Shipitko

Signed print March 27, 2024. The publication March 29, 2023. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 19.99. Publ. sign. 22.44. Edition 250 copies. Order number 9468.

Address of Editorial Board: 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 105/42,
SFU, journal “Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science”,
e-mail: izvestiya@sfedu.ru, Web Address: www.izvestiya.sfedu.ru

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

Printed in the printing department, and corporate souvenirs,
Publishing and printing complex KIBI MEDIA CENTER, SFU,
344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 1, room 104, phone (863) 243-41-66

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362. Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», ИВИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru