

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2023

2

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: 10.18522/1026-2237-2023-2

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
№ 2 (218) 2023 г.

Registration certificate
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019
issued Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media
Science magazine
Published since 1973.
4 issues per a year
No. 2 (218) 2023

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Карякин М.И., Егорова С.А.** Вычисление коэффициентов определяющих соотношений нелинейно-упругих материалов с использованием эволюционных алгоритмов .. 4
Маннаа А.С., Муратова Г.В. Разработка алгоритма построения референтных линий и углов для коленных суставов на рентгеновских снимках 15
Попов В.А. Аналитическое продолжение римановых аналитических многообразий малой размерности 21
Салманов В.И. Дифференцируемость функционала и необходимое условие для решения задачи оптимального управления с интегральным критерием качества по всей области для нелинейного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым 29
Самсонов И.К., Сумбатян М.А. О влиянии винглетов на аэродинамические свойства тонкого крыла 38
Чебаков М.И., Колосова Е.М. Взаимодействие жесткого штампа и пороупругой полосы, закрепленной на пороупругой полуплоскости 48
Щербачков М.Е., Калайдин Е.Н. Геометрические характеристики нанокapли. Ранжирование энергии капли 55
- Karyakin M.I., Egorova S.A.** Parameter Identification for Constitutive Relations of a Nonlinear-Elastic Materials Using Evolutionary Algorithms 4
Manna A.S., Muratova G.V. Development an Algorithm for Constructing Reference Lines and Angles for Knee Joints on X-ray Images 15
Popov V.A. Analytic Extension of Riemannian Analytic Manifolds of Small Dimension 21
Salmanov V.I. Differentiability of the Functional and the Necessary Condition to Solve Optimal Control Problem with Integral Criterion Qualities over the Entire Domain for a Nonlinear Schrödinger Equation with a Special Gradient Term 29
Samsonov I.K., Sumbatyan M.A. The Effect of Winglets on the Aerodynamic Properties of a Thin Wing 38
Chebakov M.I., Kolosova E.M. Interaction Between Rigid Punch and Poroelastic Strip Fixed on a Poroelastic Half-Plane 48
Shcherbakov M.E., Kalaydin E.N. Geometric Characteristics of a Nanodrop. Ranking of Drop Energy 55

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

- Ергина Е.И., Безуглова О.С.** Сравнительная характеристика литохимических особенностей черноземов северного Приазовья и Крыма 64
Иошпа А.Р., Аль-Хулайфави И.А.Д. Анализ грозовой активности на территории Ирака 75
- Ergina E.I., Bezuglova O.S.** Comparative Characteristics of the Lithochemical Features of Chernozems in the Northern Azov Sea Region and Crimea 64
Ioshpa A.R., Al-Khulaifawi I.A.J. Analysis of Thunderstorm Activity in Iraq 75

<i>Крыленко В.В., Крыленко М.В.</i> Особенности современного строения подводной аккумулятивной формы банка Еленина	81	<i>Krylenko V.V., Krylenko M.V.</i> Features of the Modern Structure of the Underwater Accumulative Form of the Elenina Bank	81
<i>Марданов И.И.</i> Экогеографические предпосылки и проблемы развития туризма в высокогорных территориях	90	<i>Mardanov I.I.</i> Ecogeographical Background and Problems of Tourism Development in High-Mountainous Territories	90
<i>Рыскалиева Д.К., Есенаманова М.С., Сырлыбек-кызы С., Сангаджиева Л.Х.</i> Анализ накопления подвижной серы в почве города Атырау	96	<i>Ryskaliyeva D.K., Yessenamanova M.S., Syrlybek-kyzy S., Sangadzhieva L.H.</i> Analysis of the Accumulation of Mobile Sulfur in the Soil of Atyrau	96
<i>Санжеев Э.Д., Намдаков М.Б.</i> Рекреационное лесопользование в регионах Северной Азии (на примере Республики Бурятия)	103	<i>Sanzheev E.D., Namdakov M.B.</i> Recreational Forest Use in the Regions of Northern Asia (for Example of the Republic of Buryatia)	103
<i>Стекольников Г.А., Курашова И.И.</i> Оценка потенциала земельных ресурсов сельскохозяйственного предприятия	115	<i>Stekolnikova G.A., Kurashova I.I.</i> Assessment of the Potential of Land Resources of an Agricultural Enterprise	115
<i>Сухоносенко Д.С.</i> Исследование характера загрязнения почвы цинком и кадмием вдоль автомобильных дорог города Волжского	121	<i>Suhonosenko D.S.</i> Study of the Character of Soil Pollution with Zinc and Cadmium Along the Roads of the City of Volzhsky	121
<i>Сытник Н.А.</i> Химико-токсикологическая характеристика и санитарно-бактериологическое состояние морской среды Керченского пролива и предпроливной зоны Черного моря как потенциального района промышленного культивирования моллюсков	130	<i>Sytnik N.A.</i> Chemical-Toxicological Characteristics and Sanitary-Bacteriological Condition of the Marine Environment of the Kerch Strait and the Pre-Strait Zone of the Black Sea as a Potential Area of Industrial Cultivation of Molluscs	130

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Щербина В.Г.</i> Влияние аллелопатии на начальных стадиях развития каштана посевного в условиях антропогенной нагрузки	138	<i>Scherbina V.G.</i> Influence of Allelopathy at the Initial Stages of the Development of the Sowing Chestnut Under the Conditions of Anthropogenic Load	138
---	-----	---	-----

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

IN MEMORY OF SCIENTIST

<i>Абанин А.В., Ватульян А.О., Казак В.В., Карякин М.И., Налбандян Ю.С., Ситник С.М.</i> Сергей Борисович Климентов (1951–2023)	151	<i>Abanin A.V., Vatulyan A.O., Kazak V.V., Karyakin M.I., Nalbandyan Yu.S., Sitnik S.M.</i> Sergei Borisovich Klimentov (1951-2023)	151
<i>Абанин А.В., Ватульян А.О., Карякин М.И., Ситник С.М.</i> Юрий Анатольевич Устинов (1934–2023) ...	153	<i>Abanin A.V., Vatulyan A.O., Karyakin M.I., Sitnik S.M.</i> Yuri Anatolyevich Ustinov (1934-2023)	153
<i>Лурье П.М., Федоров Ю.А.</i> Василий Данилович Панов (1936–2023)	155	<i>Lurie P.M., Fedorov Yu.A.</i> Vasily Danilovich Panov (1936-2023)	155

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-4-14

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

Михаил Игорьевич Карякин^{1✉}, София Андреевна Егорова²

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

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

¹karyakin@sfnedu.ru[✉]

²sofegorova@sfnedu.ru

Аннотация. Изучена возможность восстановления параметров определяющих соотношений упругих материалов на основании экспериментов по одноосному растяжению нелинейно-упругого образца призматической формы и раздуванию полого цилиндра. Моделирование экспериментов осуществляется с использованием полубратного метода нелинейной теории упругости. Для описания механических свойств исследуемых объектов материала использованы потенциалы сжимаемых нелинейно-упругих сред – материал Блейтца и Ко и материал Мурнагана. На первом этапе решен ряд прямых задач. Для задачи о растяжении используются аналитические выражения зависимости приложенной нагрузки от кратности удлинения. Трехмерная задача о раздувании цилиндра сведена к нелинейной краевой задаче для обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка для функции радиального смещения точек цилиндра. Во всех случаях построены диаграммы нагружения по заданным параметрам нелинейно-упругих моделей, которые в дальнейшем рассматриваются как исходные данные для обратной задачи, состоящей в восстановлении параметров. Задача сведена к нахождению минимума целевой функции, введенной по методу наименьших квадратов. В качестве средства анализа использованы два эволюционных алгоритма: Squirrel search algorithm (SSA), основанный на модели пищевого поведения популяции белок-летяг, и алгоритм дифференциальной эволюции (ДЭ) библиотеки SciPy. Показано надежное определение материальных параметров моделей с помощью эволюционных алгоритмов на основе диаграмм нагружения образцов, в том числе в условиях искусственного зашумления «экспериментальных» данных.

Ключевые слова: нелинейная упругость, большие деформации, полубратный метод, материал Блейтца и Ко, материал Мурнагана, обратные задачи, эволюционный алгоритм

Для цитирования: Карякин М.И., Егорова С.А. Вычисление коэффициентов определяющих соотношений нелинейно-упругих материалов с использованием эволюционных алгоритмов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 4–14.

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

Original article

PARAMETER IDENTIFICATION FOR CONSTITUTIVE RELATIONS OF A NONLINEAR-ELASTIC MATERIALS USING EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Mikhail I. Karyakin^{1✉}, Sofia A. Egorova²

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

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

¹karyakin@sfedu.ru✉

²sofegorova@sfedu.ru

Abstract. The possibility of parameter identification for constitutive relations of materials based on uniaxial stretching of a nonlinear-elastic prismatic sample and on inflating a hollow cylinder has been studied. The experiments are modeled using the semi-inverse method of nonlinear theory of elasticity. To describe the mechanical properties of the studied objects, the potentials of compressible nonlinearly elastic media - Blatz and Ko material, and Murnaghan model are used. In the first stage, a series of direct problems are solved. Analytical expressions for the load-elongation dependence are used for the stretching problem. The three-dimensional problem of a cylinder inflation is reduced to a nonlinear boundary value problem for an ordinary second-order differential equation for the function of the radial displacement of cylinder points. In all cases, load diagrams are constructed based on the specified parameters of the nonlinearly elastic models, which are subsequently considered as initial data for the inverse problem of parameter identification. The problem is reduced to finding the minimum of the objective function which is defined as a least squares function. Two evolutionary algorithms were used for analysis: the Squirrel search algorithm (SSA), based on the model of the foraging behaviour of southern flying squirrel population, and the differential evolution algorithm (DE) from the SciPy library. Reliable identification of material parameters of models was shown using evolutionary algorithms based on load diagrams of samples, including condition of artificial noise of "experimental" data.

Keywords: nonlinear elasticity, large strains, semi-inverse method, Blatz and Ko material, Murnaghan material, inverse problems, evolutionary algorithm

For citation: Karyakin M.I., Egorova S.A. Parameter Identification for Constitutive Relations of a Nonlinear-Elastic Materials Using Evolutionary Algorithms. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):4-14. (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

Определение материальных характеристик упругих тел и материалов является одной из классических задач механики. Тем не менее она до сих пор не потеряла своей актуальности, что связано прежде всего с постоянным появлением новых типов изучаемых материалов, как конструкционных, так и биологических, а также используемых для их описания математических моделей. Настоящая работа посвящена решению задач определения материальных параметров моделей, используемых для описания нелинейно-упругих свойств. Материалы, способные претерпевать большие упругие деформации, находят сегодня широкое применение в машиностроении, медицине и многих других областях.

Задача идентификации материальных параметров моделей нелинейно-упругих материалов относится к большому классу коэффициентных обратных задач [1]. Их исследованию в целом, в том числе задачам определения механических свойств материалов, посвящено множество работ. В качестве экспериментальных методов для определения параметров моделей используются одноосное растяжение [2], двухосное растяжение [3], индентирование [4, 5]. В работе [6] восстановление параметров высокоэластичных материалов проведено на основе данных о раздувании мембраны, в [7] в качестве источника информации для восстановления коэффициентов использовано решение задачи о плоском кручении полого цилиндра. В настоящей работе задача вычисления коэффициентов определяющего соотношения нелинейно-упругого материала решается на

основе моделирования экспериментов по одноосному растяжению образца в форме прямоугольной призмы и раздуванию полого кругового цилиндра.

Одним из перспективных методов решения задачи определения механических свойств материалов и конструкций является применение эволюционных алгоритмов. В [8] показано надежное восстановление параметров моделей высокоэластичных материалов с использованием генетического алгоритма в сравнении с результатами регрессионного анализа средствами конечно-элементных комплексов ABAQUS и ANSYS. С использованием эволюционных алгоритмов в [9] решена задача идентификации локализованных эффектов в композитной слоистой пленке, в [10] – задача идентификации трещины в консольной балке Эйлера – Бернулли. В работе [11] реализован оригинальный генетический алгоритм идентификации механических свойств изотропных и анизотропных материалов по информации о волновом поле смещений на свободном участке границы тела.

В настоящей работе для определения материальных параметров нелинейно-упругого материала использованы алгоритм дифференциальной эволюции из пакета SciPy [12] и алгоритм белчьего поиска Squirrel search algorithm [13], предложенный исследователями из Делийского технологического института им. Нетаджи Субхаса в 2017 г.

Математические модели механических экспериментов

Одноосное растяжение образца. В отсчетной (недеформированной) и текущей (деформированной) конфигурациях исследуемый образец имеет форму прямоугольной призмы, боковые грани которой параллельны плоскостям декартовых координат. В ходе эксперимента реализуется одноосное напряженно-деформированное состояние за счет приложения к верхней и нижней граням образца равномерно распределенной нагрузки q ; боковые грани образца остаются свободными. Процесс растяжения описывается следующим преобразованием:

$$X_1 = ax_1, X_2 = ax_2, X_3 = kx_3, \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 и X_1, X_2, X_3 – декартовы координаты в отсчетной и текущей конфигурациях; a и k – продольная и поперечная кратности удлинения.

Градиент деформации \mathbf{C} и мера деформации Коши – Грина $\mathbf{G} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^T$, соответствующие преобразованию (1), являются постоянными величинами и имеют вид

$$\mathbf{C} = a\mathbf{i}_1\mathbf{i}_1 + a\mathbf{i}_2\mathbf{i}_2 + k\mathbf{i}_3\mathbf{i}_3, \quad \mathbf{G} = a^2\mathbf{i}_1\mathbf{i}_1 + a^2\mathbf{i}_2\mathbf{i}_2 + k^2\mathbf{i}_3\mathbf{i}_3,$$

где $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ – орты декартовой системы координат.

Раздувание цилиндра. Исследуемый образец представляет собой полый круговой цилиндр с внутренним и внешним радиусами r_0 и r_1 . Деформация образца происходит за счет давления p , приложенного к его внутренней боковой поверхности и действующего по нормали к этой поверхности; верхний и нижний торцы цилиндра считаем свободными от нагрузки. Процесс раздувания описывается следующим полуобратным представлением:

$$R = f(r), \quad \Phi = \varphi, \quad Z = z, \quad (2)$$

где r, φ, z и R, Φ, Z – цилиндрические координаты в отсчетной и текущей конфигурациях соответственно; $f(r)$ – функция радиального смещения точек цилиндра.

Геометрические характеристики деформации (2) имеют вид

$$\mathbf{C} = f'(r)\mathbf{e}_r\mathbf{e}_r + \frac{f(r)}{r}\mathbf{e}_\varphi\mathbf{e}_\varphi + \mathbf{e}_z\mathbf{e}_z, \quad \mathbf{G} = (f'(r))^2\mathbf{e}_r\mathbf{e}_r + \frac{f^2(r)}{r^2}\mathbf{e}_\varphi\mathbf{e}_\varphi + \mathbf{e}_z\mathbf{e}_z,$$

где $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$ и $\mathbf{e}_R, \mathbf{e}_\Phi, \mathbf{e}_Z$ – базисные векторы цилиндрических координат в отсчетной и текущей конфигурациях соответственно, штрихом обозначено дифференцирование по переменной r .

Для описания свойств материала образцов ограничимся рассмотрением изотропных гиперупругих моделей, свойства которых полностью описываются функцией удельной потенциальной энергии деформации W , задаваемой как функция главных инвариантов $I_k = I_k(\mathbf{G})$ ($k = 1, 2, 3$) меры деформации Коши – Грина $I_1 = \text{tr}\mathbf{G}$, $I_2 = \frac{1}{2}(\text{tr}^2\mathbf{G} - \text{tr}\mathbf{G}^2)$, $I_3 = \det\mathbf{G}$.

Определяющее соотношение для тензора напряжений Пиолы \mathbf{D} сжимаемого материала имеет в этом случае вид

$$\mathbf{D} = W_{,\mathbf{C}} = 2W_{,\mathbf{G}} \cdot \mathbf{C}. \quad (3)$$

Производная $W_{,\mathbf{G}}$ находится по формуле

$$W_{,\mathbf{G}} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \mathbf{E} + \frac{\partial W}{\partial I_2} (\mathbf{E}I_1 - \mathbf{G}) + \frac{\partial W}{\partial I_3} I_3 \mathbf{G}^{-1}. \quad (4)$$

В настоящей работе будут использованы два варианта функции удельной потенциальной энергии.

Для материала Блейтца и Ко эта функция имеет вид [14, 15]

$$W = \frac{1}{2} \mu \left(\beta \left[I_1 + \frac{1}{\alpha} (I_3^{-\alpha} - 1) - 3 \right] + (1 - \beta) \left[I_2 I_3^{-1} + \frac{1}{\alpha} (I_3^{\alpha} - 1) - 3 \right] \right), \quad (5)$$

где α, β – безразмерные константы материала, $\alpha \geq 0, 0 \leq \beta \leq 1$. При малых деформациях параметр μ имеет смысл модуля сдвига, а параметр α связан с коэффициентом Пуассона ν соотношением $\alpha = \frac{\nu}{1-2\nu}$.

Тензор напряжений Пиолы для этой модели с учетом (3) и (4) записывается как $\mathbf{D} = \mu \left[\beta (\mathbf{E} - I_3^{-\alpha} \mathbf{G}^{-1}) + \frac{1-\beta}{I_3} (\mathbf{E}I_1 - \mathbf{G} + (I_3^{\alpha+1} - I_2) \mathbf{G}^{-1}) \right] \cdot \mathbf{C}$, где \mathbf{E} – единичный тензор.

Вычисление компонент безразмерного тензора Пиолы \mathbf{D}/μ требует знания двух материальных параметров: α и β .

В модели Мурнагана [16] функция удельной потенциальной энергии представляет собой полином по степеням главных инвариантов меры деформации Коши – Грина

$$W = \frac{1}{4} [(-3\lambda - 2\mu + \frac{9}{2}l + \frac{n}{2}) I_1 + \frac{1}{2}(\lambda + 2\mu - 3l - 2m) I_1^2 + (-2\mu + 3m - \frac{n}{2}) I_2 - m I_1 I_2 + \frac{1}{6}(l + 2m) I_1^3 + \frac{n}{2}(I_3 - 1)], \quad (6)$$

где λ, μ – параметры Ляме; l, m, n – константы Мурнагана.

Для обезразмеривания сделаем замены: $\tilde{l} = \frac{l}{\mu}; \tilde{m} = \frac{m}{\mu}; \tilde{n} = \frac{n}{\mu}; \tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{2\nu}{1-2\nu}$, далее тильду будем опускать. Тогда выражение тензора Пиолы для модели Мурнагана примет вид

$$\frac{1}{\mu} \mathbf{D} = \frac{1}{2} [I_1 \mathbf{E} \left(\frac{2\nu}{1-2\nu} - 3l + m - \frac{n}{2} + I_1 \frac{l}{2} \right) + \mathbf{E} \left(-\frac{6\nu}{1-2\nu} - 2 + \frac{9}{2}l + \frac{n}{2} \right) + \mathbf{G} \left(2 - 3m + \frac{n}{2} \right) + I_1 \mathbf{G}m - I_2 \mathbf{E}m + I_3 \mathbf{G}^{-1} \frac{n}{2}] \cdot \mathbf{C}.$$

Вычисление безразмерных напряжений в этом случае требует задания четырех параметров материала: ν, l, m, n .

Далее будем считать, что внешние воздействия (растягивающая распределенная нагрузка q и внутреннее давление p) тоже обезразмерены делением на модуль сдвига материала μ .

Решение прямых задач

Одноосное растяжение. Задача об одноосном растяжении образца для обеих рассматриваемых моделей может быть решена аналитически. Поскольку тензор Пиолы в данном случае постоянен и, следовательно, автоматически удовлетворяет уравнениям равновесия

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \quad (7)$$

то определению подлежат лишь параметры a и k полуобратного представления (1). Связь между ними находится из условия отсутствия напряжений на боковой поверхности $D_{11} = D_{22} = 0$.

Далее из краевого условия на торцах, состоящего в равенстве компоненты D_{33} величине растягивающей осевой нагрузки, определяется связь этой нагрузки с коэффициентом удлинения k .

Для модели Блейтца и Ко (5) условие отсутствия напряжений на боковой поверхности имеет вид $\beta(a^2 - a^{-4} \alpha k^{-2} \alpha) + (1 - \beta)(a^4 \alpha k^{2\alpha} - a^{-2}) = 0$, откуда $a = k^{\frac{\alpha}{2\alpha+1}}$.

Из краевого условия на торцах получаем

$$q = \beta \left(k - k^{\frac{4\alpha+1}{2\alpha+1}} \right) + (1 - \beta) \left(k^{\frac{1}{2\alpha+1}} - k^{-3} \right). \quad (8)$$

В случае использования модели Мурнагана для нахождения параметра a из граничных условий на боковой поверхности получаем биквадратное уравнение $Aa^4 + Ba^2 + C = 0$, коэффициенты которого имеют вид

$$A = -2(-1 + 2\nu)(2l + m),$$

$$B = [(1 - 2\nu)(4l - 2m + n)]k^2 + 2\nu(12l + 2m + n) - 12l - 2m - n + 4,$$

$$C = (-2lv + l)k^4 + (2\nu(6l - 2m + n + 2) - 6l + 2m - n)k^2 + 2\nu(-9l - n - 2) + 9l + n - 4.$$

Из двух его вещественных корней выбирается тот, который для значения параметра $k = 1$, т.е. при отсутствии растяжения, обращается в единицу, что соответствует отсутствию расширения образца

$$a = \sqrt{\frac{1}{2m+n} \left[3l - \lambda + \frac{m}{2} + \frac{n}{2} + k^2 \left(\frac{m}{2} - \frac{n}{2} - l \right) - 1 + \frac{1}{2} \sqrt{X} \right]},$$

где $X = k^4 \left[m(m - n - 6l) + n \left(\frac{n}{4} + 2l \right) \right] +$
 $+ k^2 \left[m(-2m + 12l - 8\lambda + 2n - 4) + n \left(-\frac{n}{2} + 2\lambda - 4l + 2 \right) + 8l \right] +$
 $+ m(m + 8\lambda - 6l - n + 4) + n \left(\frac{n}{4} + 2l - 2\lambda - 2 \right) + 4(\lambda^2 + 2\lambda - 2l + 1).$

Из краевого условия на торцах получаем

$$q = k \left(-1 - \frac{3\lambda}{2} + \frac{n}{4} + \frac{9l}{4} \right) + k^3 \left(1 + \frac{\lambda}{2} - \frac{3l}{2} - m \right) + k^5 \left(\frac{l}{4} + \frac{m}{2} \right) +$$

$$+ \frac{k(4l-2m+n)}{64(2l+m)^2} (Y + \sqrt{Z})^2 + \frac{k(2lk^2+2\lambda-6l+2m-n)}{8(2l+m)} (Y + Z),$$

$$Y = 12l - 4\lambda - 4 + 2m + n + k^2(-4l + 2m - n),$$

$$Z = 4m(8\lambda - 6l + m - n + 4) + n(8l - 8 + n) + 8\lambda(2\lambda + 4 - n) + 16(1 -$$

 $- 2l) + k^2[8m(-4\lambda - 2 + 6l - m + n) + 2n(4\lambda + 4 - 8l - n) +$
 $+ 32l] + k^4[4m(-6l + m - n) + n(8l + n)].$

На рис. 1 в качестве примера приведены диаграммы растяжения, построенные при использовании упрощенного варианта модели материала Блейтца и Ко ($\alpha = \frac{1}{2}, \beta = 0$) и трех наборов материальных констант модели Мурнагана, соответствующих таким материалам [14], как сталь Rex 535: $\nu = 0,269, l = -1,103, m = -8,064, n = -9,333$, медь: $\nu = 0,346, l = -2,264, m = -13,082, n = -33,375$ и вольфрам: $\nu = 0,272, l = -3,449, m = -5,781, n = -7,796$.

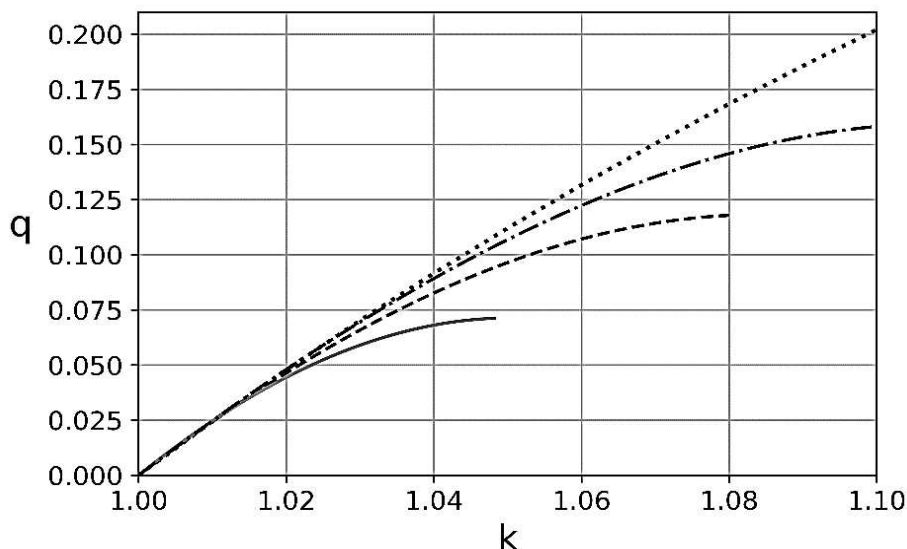


Рис. 1. Диаграмма растяжения образца модели Мурнагана из стали Rex 535 (штриховая линия), меди (сплошная линия), вольфрама (штрихпунктирная линия), а также для упрощенной модели Блейтца и Ко (пунктирная линия) / Fig. 1. The line patterns represent the stress-strain diagram for Murnaghan material with copper (solid line), tungsten (dash-dotted line) and steel Rex 535 (dashed line), parameters and also for simplified version of the Blatz and Ko material respectively (dotted line)

Раздувание цилиндрической трубки. Тензор напряжений Пиолы, соответствующий преобразованию (2), имеет следующую структуру: $\mathbf{D} = D_{rR}(r)\mathbf{e}_r\mathbf{e}_R + D_{\phi\Phi}(r)\mathbf{e}_\phi\mathbf{e}_\Phi + D_{zZ}(r)\mathbf{e}_z\mathbf{e}_Z$.

Векторное уравнение равновесия (7) сводится к скалярному дифференциальному уравнению второго порядка относительно функции $f(r)$

$$\frac{dD_{rR}(r)}{dr} + \frac{D_{rR}(r) - D_{\phi\Phi}(r)}{r} = 0. \quad (9)$$

Граничное условие на внутренней поверхности цилиндра, находящейся под действием гидростатического давления p , принимает вид [17] $\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = -p \det \mathbf{C} \mathbf{n} \cdot \mathbf{C}^{-T}$.

Введем безразмерные величины $\tilde{r} = r/r_1$, $\tilde{r}_0 = r_0/r_1$, $\tilde{f} = f/r_1$, $\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{D}/\mu$.

Далее тильду будем опускать. Граничные условия для уравнения (9) перепишем в безразмерном виде

$$D_{rR} = \begin{cases} -p \frac{f(r)}{r}, & r = r_0, \\ 0, & r = 1. \end{cases} \quad (10)$$

С помощью полуобратного метода трехмерная задача о раздувании цилиндра сведена к нелинейной краевой задаче для обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка для функции радиального смещения точек цилиндра. В частности, для упрощенной модели Блейтца и Ко, когда $\alpha = \frac{1}{2}$, $\beta = 0$, краевая задача (9), (10) приводится к виду

$$f''(r) = -\frac{(f'(r))^4 r^3 - f'(r)(f(r))^3}{3r(f(r))^3}, \quad (f'(r))^3 f(r) - r = \begin{cases} -p(f'(r))^3 f(r), & r = r_0, \\ 0, & r = 1. \end{cases}$$

Для модели Мурнагана краевая задача (9), (10) приводится к виду

$$f'' = (-rf' + f) \frac{N}{D}, \quad (11)$$

где $N = \sum_{i=1}^5 N_i$, $D = r^2 \sum_{j=1}^3 D_j$,

$$N_1 = r^4 (f'^4 (l + 2m) + 2f'^2 (-2l + \lambda - 2m + 2) + 4l - 4\lambda + 2m - 4),$$

$$N_2 = 2r^3 f f' (f'^2 (2l + m) - 4l + 2\lambda - 2m + 2),$$

$$N_3 = 2r^2 f^2 (f'^2 (l + m) - 2l + \lambda - 2m + 2), \quad N_4 = 2r f' f^3 (2l + m), \quad N_5 = f^4 (l + 2m),$$

$$D_1 = r^4 (5f'^4 (l + 2m) + 6f'^2 (-2l + \lambda - 2m + 2) + 4l - 4\lambda + 2m - 4),$$

$$D_2 = 2r^2 f^2 (3lf'^2 - 2l + \lambda), \quad D_3 = f^4 l,$$

$$f'(N_1 + N_6 + D_3) = \begin{cases} -4pr^3 f, & r = r_0, \\ 0, & r = 1. \end{cases} \quad (12)$$

$$N_6 = 2r^2 f^2 (f'^2 l - 2l + \lambda).$$

Для численного решения подобных краевых задач использовался пакет SciPy [12]. На рис. 2 представлены диаграммы раздувания цилиндра – соотношение между приложенным безразмерным давлением p и радиусом деформированного цилиндра $R(r_0)$ при $\frac{r_0}{r_1} = 0,9$ для упрощенного варианта модели материала Блейтца и Ко и трех наборов материальных констант модели Мурнагана, соответствующих стали Rex 535, меди и вольфраму.

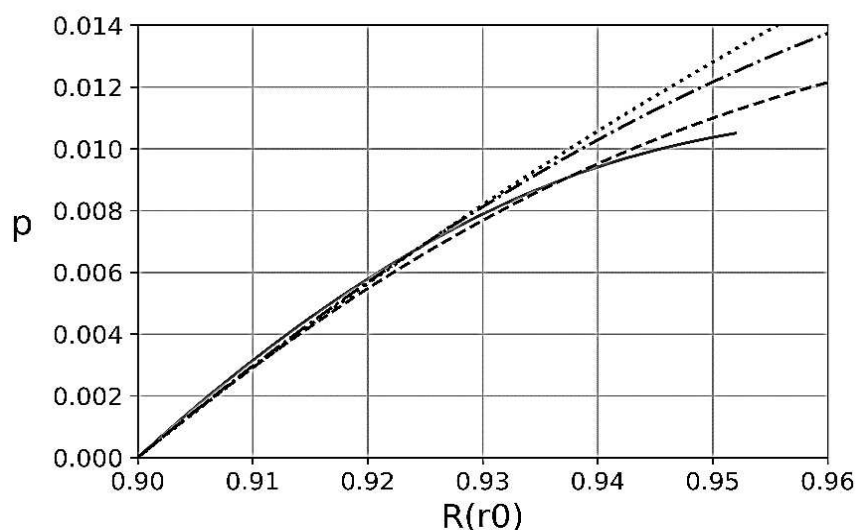


Рис. 2. Диаграмма раздувания образца модели Мурнагана из стали Rex 535 (штриховая линия), из меди (сплошная линия), из вольфрама (штрихпунктирная линия), а также для упрощенной модели Блейтца и Ко (пунктирная линия) / Fig. 2. The line patterns represent the inflation diagram for Murnaghan material with copper (solid line), tungsten (dash-dotted line) and steel Rex 535 (dashed line), parameters and also for simplified version of the Blatz and Ko material respectively (dotted line)

Обратные задачи

Методы решения обратных задач. Цель дальнейшего исследования состоит в восстановлении параметров рассматриваемых нелинейно-упругих моделей на основе известных диаграмм нагружения. В настоящей работе вместо реальных экспериментальных данных будут использованы результаты решения прямых задач.

Задача восстановления параметров сводится к задаче нахождения минимума функции отклонения расчетных теоретических данных от экспериментальных с использованием метода наименьших квадратов. Входными данными являются точки диаграмм нагружения образцов: массив значений нагрузки y_i и соответствующие этим значениям величины деформационного параметра k_i ($i = 1, \dots, M$, M – число точек на диаграмме нагружения). В случае одноосного растяжения k_i – это кратности удлинения образца, в случае раздувания – значения внутреннего радиуса деформированного цилиндра. Считая, что модель материала описывается параметрами x_1, x_2, \dots, x_n , для каждого набора этих параметров можем вычислить теоретические значения нагрузки y_i^* по известным значениям k_i . Тогда задача восстановления параметров x_j сводится к задаче нахождения минимума функции

$$F = \sum_{i=1}^M (y_i - y_i^*)^2. \quad (13)$$

В качестве средства численной минимизации в настоящей работе использованы алгоритм дифференциальной эволюции и алгоритм беличьего поиска.

Метод дифференциальной эволюции. Дифференциальная эволюция (ДЭ) – широко распространенный эффективный алгоритм многомерной математической оптимизации, относящийся к классу стохастических алгоритмов. Он был предложен Р. Сторном и К. Прайсом в 1995 г. и развит в их более поздних работах [18]. Алгоритм ДЭ использует некоторые идеи генетических алгоритмов, однако в отличие от последних полагается на мутацию, а не на кроссовер. Он является прямым, т. е. не требующим вычисления производных целевой функции, предназначен для нахождения глобального оптимума недифференцируемых, нелинейных, многоэкстремальных функций многих вещественных переменных. В настоящей работе используется его версия, реализованная в пакете SciPy языка Python [12].

Алгоритм беличьего поиска. Squirrel search algorithm (SSA) – алгоритм оптимизации, предложенный исследователями М. Jain, V. Singh и А. Rani в 2017 г. для решения неограниченных задач численной оптимизации [13]. Алгоритм имитирует пищевое поведение белок-летяг, обитающих в Европе и Южной Азии. Исходный алгоритм и различные его модификации успешно применялись при решении различных инженерных задач многоцелевой оптимизации в динамических системах [19], например для поиска оптимального потока мощности для конденсаторных устройств с тиристорным управлением [20].

Для алгоритма SSA размер популяции выбирался равным 50, для ДЭ – 15. Для обоих алгоритмов условием останова являлось достижение задаваемого максимального числа итераций.

Восстановление параметров материала Блейтца и Ко. Для большой области значений параметров α , β этой модели на диаграмме растяжения существует точка максимума, за которой следует падающий участок, где приложенная нагрузка убывает с возрастанием деформации, т.е. наблюдается потеря устойчивости образца [21]. Далее полагаем, что эксперименты моделируют устойчивое нагружение образцов, т.е. предельная величина нагрузки существенно меньше расчетной максимальной.

Обозначим через α^* , β^* параметры материала, для которых решена прямая задача, т.е. по этим параметрам сгенерированы данные диаграммы нагружения, считающиеся «экспериментальными». Диапазон поиска материальных параметров α , β , считающихся неизвестными, зададим соотношениями $\alpha \in [-0,5\alpha^*; 1,5\alpha^*]$, $\beta \in [0; 1]$.

Оба эволюционных алгоритма позволяют на основе информации о диаграмме растяжения образца за десять итераций практически точно восстановить значения параметров $\alpha^* = \frac{1}{2}$, $\beta^* = 0$, соответствующих упрощенной модели Блейтца и Ко: восстановленное значение α находится в диапазоне $[0,499-0,5001]$, значение β не превосходит $3 \cdot 10^{-4}$. На первый взгляд, такая высокая точность при решении обратной задачи связана исключительно с существованием простой аналитической формулы (8), описывающей растяжение. Представляется, что не менее важным об-

стоятельством является наличие небольшого количества (только двух) восстанавливаемых параметров в определяющем соотношении (5). Действительно, при рассмотрении обратной задачи нахождения этих параметров по диаграмме раздувания трубки, когда прямая задача не имеет аналитического решения, за те же десять итераций параметры α^* и β^* восстанавливаются вполне удовлетворительно: в худшем случае вместо 0,5 получаем 0,498, а вместо нуля – 0,0013. Отметим также, что использование модели Блейтца и Ко не позволило сделать заключение о предпочтительности одного из двух эволюционных алгоритмов: для задачи о растяжении в среднем быстрее и точнее работал алгоритм ДЭ, а для задачи о раздувании – алгоритм SSA.

Восстановление параметров материала Мурнагана. В качестве примера решения обратных задач для этой модели ограничимся набором значений, соответствующих стали Rex535 [14]: $\nu = 0,269$, $l = -1,103$, $m = -8,064$, $n = -9,333$.

При проведении расчетов будем считать, что параметры Ляме, или модули упругости первого порядка, известны, т.е. коэффициент ν задан, а искомыми являются только модули упругости второго порядка, или параметры Мурнагана: l , m , n . Вопрос области поиска параметров по известной диаграмме не является тривиальным, поскольку и в этом случае возможны как явления потери устойчивости при растягивающих нагрузках, так и целый ряд других особенностей этой модели, делающей ее механически некорректной при некоторых значениях коэффициентов или величины деформационной характеристики [22]. Для указанных выше параметров в качестве области поиска был выбран диапазон $\pm 50\%$ от известного значения для каждой константы, позволяющий в ходе расчетов не выходить за пределы корректности задачи.

В таблице представлены средние по пяти прогонам алгоритмов SSA и ДЭ найденные значения параметров l , m , n ; количество итераций алгоритмов равно 100.

Определение параметров Мурнагана с помощью алгоритмов ДЭ и SSA
 / Murnaghan parameters identification using DE and SSA

Алгоритм		Параметры Мурнагана			Целевая функция $F(l, m, n)$
		l	m	n	
		-1,103	-8,064	-9,333	
Одноосное растяжение	ДЭ	-1,103	-8,064	-9,333	1,15e-21
	SSA	-0,982	-8,086	-9,224	1,69e-11
Раздувание	ДЭ	-1,052	-8,072	-8,966	1,67e-10
	SSA	-1,101	-8,064	-14,000	1,55e-13

Следует обратить внимание, что метод дифференциальной эволюции и для этой модели оказался предпочтительнее в случае одноосного растяжения. В случае же раздувания трубки ситуация менее однозначна. Она усугубляется тем, что, как показали расчеты, диаграмма нагружения в этом случае гораздо менее чувствительна к параметру n : ошибка в его определении на 50 % не влияет на итоговое значение целевой функции (13); более важными для ее минимизации являются параметры l и m . Вопрос чувствительности решения прямой задачи к материальным параметрам требует отдельного исследования.

Учет возможной зашумленности данных. Аналитические формулы, описывающие диаграмму нагружения, позволяют достаточно быстро осуществить первичный анализ влияния шума в исходных данных на качество восстановления материальных параметров. Для моделирования шума решение прямой задачи искажалось добавлением ко всем значениям растягивающей нагрузки случайных значений, которые считались равномерно распределенными в диапазоне $[-0,05u_{max}; 0,05u_{max}]$, где u_{max} – максимальное значение нагрузки на исследуемой диаграмме нагружения. В случае модели Блейтца и Ко, описывающей высокоэластичные тела, это максимальное значение соответствовало деформации образца на 100 %, а в случае модели Мурнагана – деформации на 8 %.

На рис. 3 результаты восстановления параметров модели Блейтца и Ко и Мурнагана при использовании пятисот итераций алгоритма SSA представлены в графическом виде. Что касается количественных характеристик этого восстановления в случае материала Блейтца и Ко

($\alpha^* = \frac{1}{2}, \beta^* = 0$), найденные значения параметра α находились в диапазоне [0,485–0,488], а значение параметра β не превосходило 0,001. Для материала Мурнагана при указанном способе моделирования зашумленности исходных данных параметры l и n определялись с погрешностью до 50 %, а вот параметр m восстанавливался достаточно надежно: погрешность его определения не превосходила 5 %, т.е. не превосходила ошибку в исходных данных.

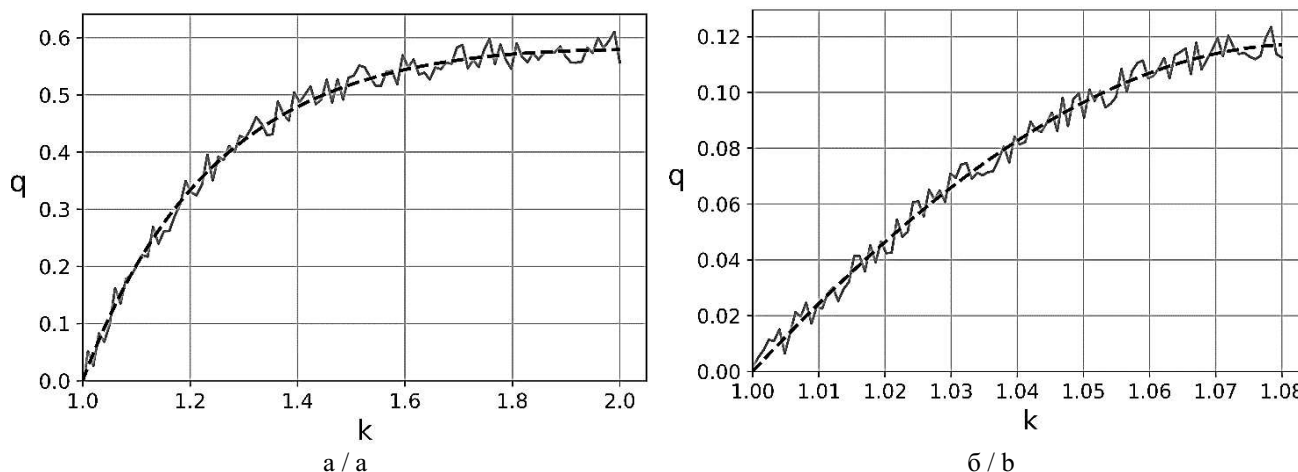


Рис. 3. Определение параметров моделей: а – Блейтца и Ко; б – Мурнагана. Сплошная линия – зашумленная диаграмма растяжения; штриховая линия – результат работы алгоритма SSA
 / Fig. 3. Parameter identification of models: a - for Blatz and Ko; b - Murnaghan material.
 Solid line - experimental stress-strain diagram; dashed line - result of using SSA

Заключение

В работе смоделированы эксперименты по одноосному растяжению образца призматической формы и по раздуванию полой круговой цилиндрической трубки. Для описания механических свойств исследуемых объектов использованы употребительные модели сжимаемых нелинейно-упругих тел – материал Блейтца и Ко и материал Мурнагана. Диаграмма нагружения, т.е. зависимость между приложенной нагрузкой и деформационным параметром, в задаче о растяжении бруса строится на основании аналитических формул, в задаче о раздувании – путем решения нелинейной краевой задачи для дифференциального уравнения второго порядка. Построенные решения прямых задач используются далее в качестве входных данных для анализа модельных обратных задач о восстановлении параметров функции энергии нелинейно-упругого материала по данным о его диаграмме нагружения. Возникающие в ходе этого анализа задачи минимизации функций решались с использованием двух эволюционных алгоритмов. Полученные результаты восстановления параметров материала, в том числе для зашумленных входных данных, позволяют говорить об эффективности и перспективности применения рассмотренных эволюционных алгоритмов к решению задач идентификации параметров математических моделей. Среди важных направлений будущих исследований следует выделить расширение круга моделируемых экспериментов, в том числе с использованием конечно-элементных схем, анализ чувствительности данных экспериментов различного типа к материальным параметрам – коэффициентам моделей, а главное – использование в расчетах данных, полученных в реальных экспериментах.

Список источников

1. Ватульян А.О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 224 с.
2. Brunel H., Ambard D., Dufour H., Roche P.H., Costalat V., Jourdan F. Rupture limit evaluation of human cerebral aneurysms wall: Experimental study // J. of Biomechanics. 2018. Vol. 77. P. 76–82.
3. Evin M., Sudres P., Weber P., Godio Raboutet Y., Arnoux P.-J., Wagnac E., Petit Y., Tillier Y. Experimental Bi-axial tensile tests of spinal meningeal tissues and constitutive models comparison // Acta Biomaterialia. 2022. Vol. 140. P. 446–456.

4. Haddad S.M.H., Dhaliwal S.S., Rotenberg B.W., Ladak H.M., Samani A. Estimation of the hyperelastic parameters of fresh human oropharyngeal soft tissues using indentation testing // *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020. Vol. 108. P. 103798.
5. Suzuki R., Ito K., Lee T., Ogihara N. Parameter identification of hyperelastic material properties of the heel pad based on an analytical contact mechanics model of a spherical indentation // *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017. Vol. 65. P. 753–760.
6. Zhou L., Wang S., Li L., Fu Y. An evaluation of the Gent and Gent-Gent material models using inflation of a plane membrane // *International J. of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 146–147. P. 39–48.
7. Ватульян А.О., Сухов Д.Ю. Об одном методе определения параметров упругих потенциалов // *Экол. вестн. науч. центров ЧЭС*. 2012. № 4. С. 27–32.
8. López-Campos J.A., Segade A., Casarejos E., Fernández J.R., Díaz G.R. Hyperelastic characterization oriented to finite element applications using genetic algorithms // *Advances in Engineering Software*. 2019. Vol. 133. P. 52–59.
9. Gomes G.F., de Almeida F.A. Tuning metaheuristic algorithms using mixture design: Application of sunflower optimization for structural damage identification // *Advances in Engineering Software*. 2020. Vol. 149. P. 102877.
10. Moezi S.A., Zakeri E., Zare A. A generally modified cuckoo optimization algorithm for crack detection in cantilever Euler-Bernoulli beams // *Precision Engineering*. 2018. Vol. 52. P. 227–241.
11. Баранов И.В., Ватульян А.О., Соловьев А.Н. Об одном генетическом алгоритме и его применении в обратных задачах идентификации упругих сред // *Вычислительные технологии*. 2006. № 3. С. 14–25.
12. SciPy. Fundamental algorithms for scientific computing in Python. URL: <https://scipy.org/> (дата обращения: 15.11.2022).
13. Mohit J., Singh V., Rani A. A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019. Vol. 44. P. 148–175.
14. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
15. Blatz P.J., Ko W.L. Application of finite elastic theory to the deformation of rubbery materials // *Transactions of the Society of Rheology*. 1962. Vol. 6. P. 223–251.
16. Murnaghan F.D. Finite deformation of an elastic solid. New York: Wiley, 1951. 140 p.
17. Зубов Л.М. Методы нелинейной теории упругости в теории оболочек. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1982. 144 с.
18. Storn R., Price K. Differential Evolution – a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces // *J. of Global Optimization*. 1997. Vol. 11. P. 341–359.
19. Wang Y., Du T., Liu T., Zhang L. Dynamic Multiobjective Squirrel Search Algorithm Based on Decomposition With Evolutionary Direction Prediction and Bidirectional Memory Populations // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 115997–116013.
20. Harikal M., Balasubbareddy M. A Novel Squirrel Search Optimization Algorithm for Solving Optimal Power Flow Problem with TCSC Device // *J. of Interdisciplinary Cycle Research*. 2020. Vol. XII, is. VII. P. 1304–1310.
21. Карякин М.И. Равновесие и устойчивость растягиваемого нелинейно-упругого стержня // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2007. № 4. С. 22–27.
22. Карякин М.И., Обрезков Л.П. Устойчивость цилиндра из материала Мурнагана при растяжении, сжатии и раздувании // *Проблемы прочности и пластичности*. 2019. Т. 81, № 1. С. 30–39.

References

1. Vatulyan A.O. *Inverse problems in the mechanics of a deformable solid*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2007. 224 p. (In Russ.).
2. Brunel H., Ambard D., Dufour H., Roche P.H., Costalat V., Jourdan F. Rupture limit evaluation of human cerebral aneurysms wall: Experimental study. *Journal of Biomechanics*. 2018;77:76-82.
3. Evin M., Sudres P., Weber P., Godio Raboutet Y., Arnoux P.-J., Wagnac E., Petit Y., Tillier Y. Experimental Bi-axial tensile tests of spinal meningeal tissues and constitutive models comparison. *Acta Biomaterialia*. 2022;140:446-456.
4. Haddad S.M.H., Dhaliwal S.S., Rotenberg B.W., Ladak H.M., Samani A. Estimation of the hyperelastic parameters of fresh human oropharyngeal soft tissues using indentation testing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;108:103798.
5. Suzuki R., Ito K., Lee T., Ogihara N. Parameter identification of hyperelastic material properties of the heel pad based on an analytical contact mechanics model of a spherical indentation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017;65:753-760.
6. Zhou L., Wang S., Li L., Fu Y. An evaluation of the Gent and Gent-Gent material models using inflation of a plane membrane. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;146-147:39-48.

7. Vatulyan A.O., Sukhov D.Yu. On a method for determining the parameters of elastic potentials. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov ChES = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2012;(4):27-32. (In Russ.).
8. López-Campos J.A., Segade A., Casarejos E., Fernández J.R., Dias G.R. Hyperelastic characterization oriented to finite element applications using genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*. 2019;133:52-59.
9. Gomes G.F., de Almeida F.A. Tuning metaheuristic algorithms using mixture design: Application of sunflower optimization for structural damage identification. *Advances in Engineering Software*. 2020;149:102877.
10. Moezi S.A., Zakeri E., Zare A. A generally modified cuckoo optimization algorithm for crack detection in cantilever Euler-Bernoulli beams. *Precision Engineering*. 2018;52:227-241.
11. Baranov I.V., Vatulyan A.O., Solov'ev A.N. On a genetic algorithm and its application in inverse problems of identification of elastic media. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*. 2006;(3):14-25. (In Russ.).
12. *SciPy. Fundamental algorithms for scientific computing in Python*. Available from: <https://scipy.org/> [Accessed 15th November 2022].
13. Mohit J., Singh V., Rani A. A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019;44:148-175.
14. Lur'e A.I. *Nonlinear theory of elasticity*. Moscow: Nauka Publ.; 1980. 512 p. (In Russ.).
15. Blatz P.J., Ko W.L. Application of finite elastic theory to the deformation of rubbery materials. *Transactions of the Society of Rheology*. 1962;6:223-251.
16. Murnaghan F.D. *Finite deformation of an elastic solid*. New York: Wiley Publ.; 1951. 140 p.
17. Zubov L.M. *Methods of nonlinear elasticity theory in shell theory*. Rostov-on-Don: Rostov University Press; 1982. 144 p. (In Russ.).
18. Storn R., Price K. Differential Evolution – A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*. 1997;11:341-359.
19. Wang Y, Du T., Liu T., Zhang L. Dynamic Multiobjective Squirrel Search Algorithm Based on Decomposition With Evolutionary Direction Prediction and Bidirectional Memory Populations. *IEEE Access*. 2019;7:115997-116013.
20. Harikal M., Balasubbareddy M. A Novel Squirrel Search Optimization Algorithm for Solving Optimal Power Flow Problem with TCSC Device. *Journal of Interdisciplinary Cycle Research*. 2020;XII(VII):1304-1310.
21. Karyakin M.I. Equilibrium and stability of the stretching nonlinearly elastic rod. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2007;(4):22-27. (In Russ.).
22. Karyakin M.I., Obrezkov L.P. Stability of a cylinder from Murnaghan material under stretching, compression and inflation. *Problemy prochnosti i plastichnosti = Problems of Strength and Plasticity*. 2019;81(1):30-39. (In Russ.).

Информация об авторах

М.И. Карякин – доктор физико-математических наук, доцент, директор Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный федеральный университет; старший научный сотрудник, отдел дифференциальных уравнений, Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН.

С.А. Егорова – магистрант, кафедра теории упругости, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

M.I. Karyakin - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Elasticity Theory, Director of Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University; Senior Researcher, Department of Differential Equations, Southern Mathematical Institute - Branch of the Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

S.A. Egorova - Master, Department of Elasticity Theory, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University.

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; одобрена после рецензирования 16.01.2023; принята к публикации 19.05.2023. The article was submitted 22.12.2022; approved after reviewing 16.01.2023; accepted for publication 19.05.2023.

Научная статья

УДК 004.932.2

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-15-20

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ РЕФЕРЕНТНЫХ ЛИНИЙ И УГЛОВ ДЛЯ КОЛЕННЫХ СУСТАВОВ НА РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКАХ

Али Сажи Маннаа¹, Галина Викторовна Муратова²✉

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

¹ mannaa@sfedu.ru

² muratova@sfedu.ru✉

Аннотация. Представлены результаты разработки алгоритма построения референтных линий и углов для обработки рентгеновских снимков. Проблема улучшения качества рентгеновских снимков является актуальной прикладной и научной задачей, так как количество операций по замене суставов с каждым годом возрастает из-за общей тенденции старения населения. Перед врачами стоит задача сохранения органов пациенту и обеспечения качества жизнедеятельности. Поэтому данная проблематика является актуальной как для медиков, так и для инженеров.

Разработка программного обеспечения, реализующего улучшенный метод построения референтных линий и углов, позволит улучшить качество рентгеновских снимков при проведении медицинских обследований.

В качестве практического применения рассмотрен случай области коленного сустава. Предлагаемый алгоритм состоит из набора шагов по улучшению изображения на рентгенограммах (модифицированный детектор границ Кэнни, алгоритм сегментации, расширение, идентификация опорной линии и т.д.). Результаты проведенных исследований показывают, что программная реализация алгоритма дает эффект повышения качества диагностики и выработки корректных методов лечения пораженных участков кости.

Ключевые слова: референтные линии, рентгеновские снимки, алгоритм Кэнни, алгоритм водораздела

Для цитирования: Маннаа А.С., Муратова Г.В. Разработка алгоритма построения референтных линий и углов для коленных суставов на рентгеновских снимках // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 15–20.

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

Original article

DEVELOPMENT AN ALGORITHM FOR CONSTRUCTING REFERENCE LINES AND ANGLES FOR KNEE JOINTS ON X-RAY IMAGES

Ali S. Manna¹, Galina V. Muratova²✉

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

¹ mannaa@sfedu.ru

² muratova@sfedu.ru✉

Abstract. This article is devoted to presenting the results of using the algorithm for constructing reference lines and angles for processing X-ray images. The problem of improving the quality of X-ray images is an urgent applied and scientific task, since the number of joint replacement operations increases every year due to the general trend of aging of the population. Doctors are faced with the task of preserving the patient's organs and ensuring the quality of life. Therefore, this issue is relevant for both physicians and engineers.

The development of software implementing an improved method of constructing reference lines and angles will improve the quality of X-ray images during medical examinations.

As a practical application, the case of the area of the knee joint is considered. The proposed algorithm consists of a set of steps to improve the image on the radiographs (modified Canny bounds detector, segmentation

© Маннаа А.С., Муратова Г.В., 2023

algorithm, expansion, reference line identification, etc.). The research results show that the software implementation of the algorithm has the effect of improving the quality of diagnosis and the development of correct methods of treatment of the affected bone areas.

Keywords: reference lines, X-ray images, Canny algorithm, watershed algorithm

For citation: Manna A.S., Muratova G.V. Development an Algorithm for Constructing Reference Lines and Angles for Knee Joints on X-ray Images. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):15-20. (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 улучшения качества рентгеновских снимков является актуальной научно-практической задачей, так как количество медицинских операций по замене суставов с каждым годом возрастает из-за общей тенденции старения населения. Вследствие этого будет возрастать потребность в проведении медицинских операций по замене тазобедренных и коленных суставов. Перед врачами стоит задача сохранения органов пациенту и обеспечения качества жизнедеятельности. Поэтому данная проблематика является актуальной как для исследователей, так и для врачей-практиков.

Исследование существующих программных продуктов показало, что на рынке программного обеспечения существуют подобные системы, но они не настолько просты в эксплуатации, как предлагаемый программный продукт.

Применение разработанного программного обеспечения, реализующего улучшенный метод построения референтных линий и углов, позволит улучшить качество рентгеновских снимков при проведении медицинских обследований.

Существует метод референтных линий и углов для определения отклонения от анатомической нормы и планирования реконструктивных операций. Для большей точности при выявлении деформаций нижних конечностей используются референтные линии и углы, которые разделяются на анатомические и механические [1].

В нормальном состоянии референтные линии пересекаются между собой. Пересечение происходит в определенных точках и под определенным углом. Если есть показатели, которые отличаются от принятых за норму, то следует констатировать наличие той или иной деформации [2]. На рис. 1 представлены референтные линии и углы. У практически здоровых молодых людей угол составляет $85,5 \pm 2,9^\circ$ по сравнению с аналогичными данными мужчин старшего возраста, у которых он составляет $87,5 \pm 2,6^\circ$.

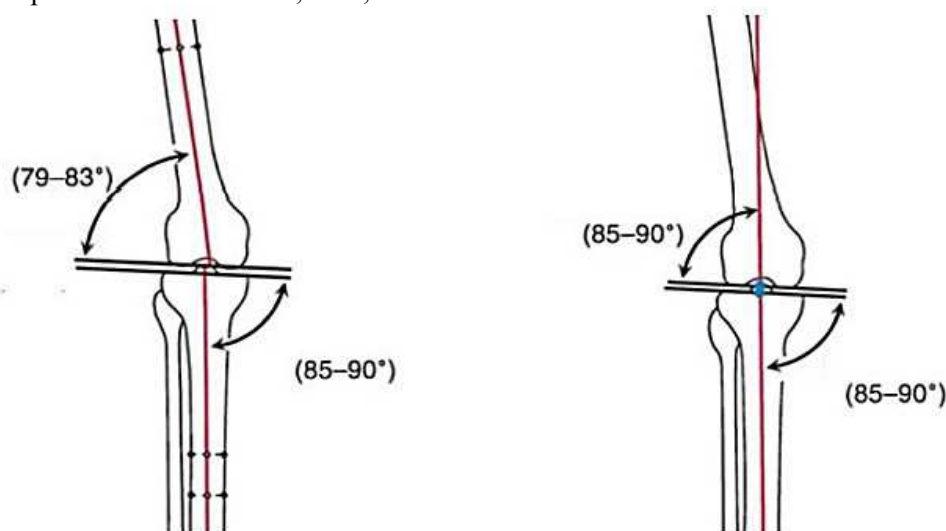


Рис. 1. Углы коленного сустава у здоровых молодых людей (слева) и у мужчин старшего возраста (справа) / Fig. 1. The angles of the knee joint in healthy young people (on the left) and the angles in older men (on the right)

Постановка задачи

Задача состоит в том, чтобы разработать алгоритм анализа рентгенографических изображений коленного сустава, а также точного и быстрого нахождения (анатомических) опорных линий и углов, что принципиально поможет врачам в принятии соответствующего решения о проведении операции пациенту.

Алгоритм

Сравнивая предложенный алгоритм с обсуждаемым в работе [3], мы обнаруживаем, что данный алгоритм работает быстрее, потому что в алгоритме Кэнни улучшен фильтр Гаусса без необходимости добавления внешнего фильтра [4], что, в свою очередь, увеличивает время выполнения программы. Кроме того, использование предложенного алгоритма способствовало получению лучшей точности и результатов в случае изображений радиалов с высоким уровнем шума.

Алгоритм построения референтных линий и углов на рентгеновских снимках работает следующим образом. На первом этапе используется улучшенный гауссовый фильтр в алгоритме Кэнни для рентгеновских снимков [1, 4, 5]. Для выбора правильного значения σ (стандартное отклонение) используется среднее отклонение в статистическом методе адаптивного гауссовского фильтра. Для этого мы сравниваем абсолютное значение точки пикселя серого цвета $|x(i, j)|$ с $|x(i, j)| \times |x(i, j) - \mu|$. Если $|x(i, j)| < |x(i, j)| \times |x(i, j) - \mu|$, то $\sigma = 1$, т.е. точка считается менее затронутой шумом. В противном случае $\sigma = 1.6$, т.е. шум в данной точке будет значительным [2, 6]. После этого для автоматического определения T1, T2 для детектора границ Кэнни мы вычисляем интегральную таблицу для изображения и среднюю интенсивность пикселей, чтобы получить стандартное отклонение. Далее мы применяем метод Оцу [7], чтобы получить T1, T2. Экспериментально мы получили, что $T1 = 0,1 \times otsu.std()$, $T2 = 0,5 \times otsu.std()$. Результат показан на рис. 2.

На втором этапе используется алгоритм водораздела для разделения различных объектов на изображении [8]. Результат показан на рис. 3.

На третьем этапе вычисляем центр масс значений массива в метках.

После выбора точки интереса с использованием алгоритма водораздела контуры рисуются на выбранных метках точек интереса [9].

Для построения опорных линий были рассчитаны крайние точки по контуру выбранной метки области кости. Выбираем точки интереса с использованием алгоритма водораздела. Вычисляем центр масс значений массива в метках.

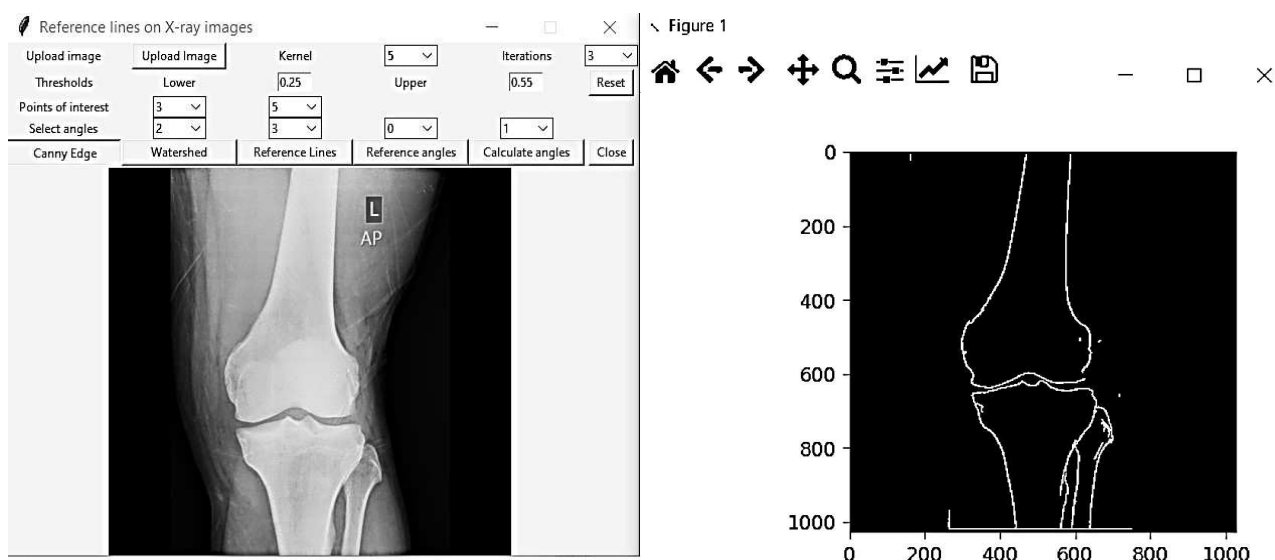


Рис. 2. Результат работы алгоритма Кэнни с улучшенным гауссовским фильтром
 / Fig. 2. The result of the Canny algorithm with an improved Gaussian filter

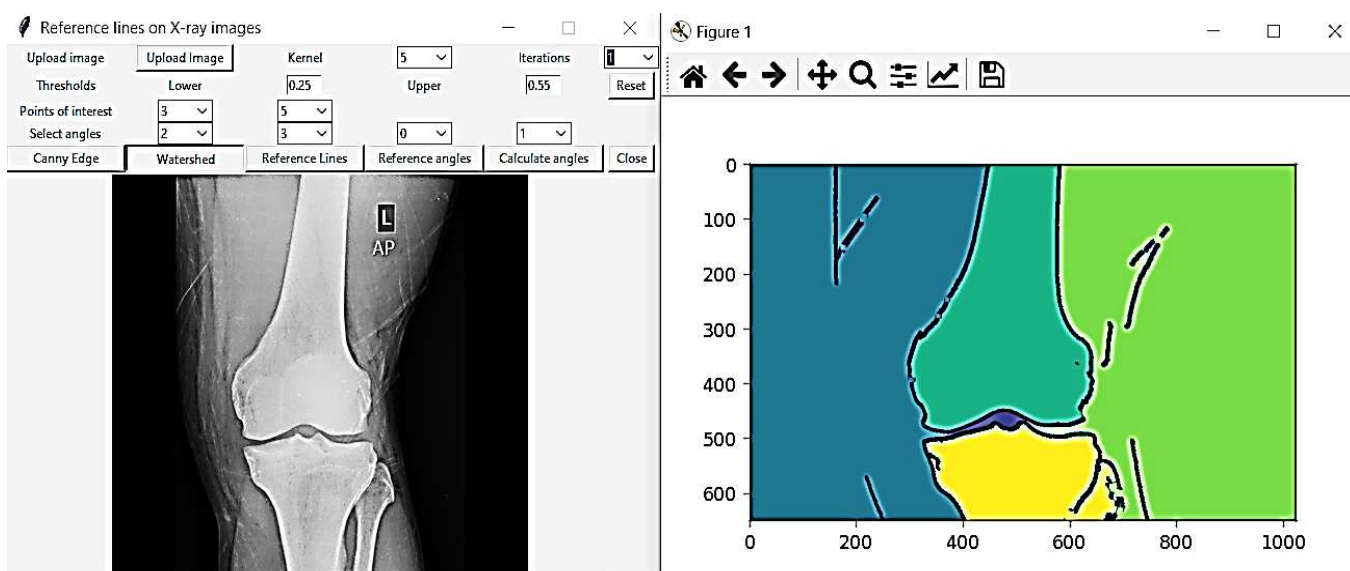


Рис. 3. Результат работы алгоритма водораздела / Fig. 3. The result of the watershed algorithm

Мы можем найти центр капли, используя моменты. Но прежде всего, мы должны знать, что именно представляет собой момент изображения. Момент изображения – конкретное средневзвешенное значение интенсивности пикселей изображения, с помощью которого мы можем найти некоторые специфические свойства изображения, такие как радиус, площадь, центроид и т.д. Чтобы найти центр тяжести изображения, мы обычно преобразуем его в двоичный формат, а затем находим его центр. После получения крайних точек со всех четырех сторон мы возьмем среднюю точку верхней части верхней кости и среднюю точку нижней части области нижней кости и проведем линию через центр масс: $a = (1,0 \times (y_2 - y_1)) \div (1,0 \times (x_2 - x_1))$, $b = -a \times x_1 + y_1$, $x_1 = y_1 - b \div a$, $x_2 = y_2 - b \div a$.

Здесь была использована формула нахождения угла между тремя точками двух прямых: a , b , c – три точки координат обеих прямых. Две крайние точки обеих линий и одна точка – общая точка, где обе линии соединены друг с другом. Результаты показаны на рис. 4.

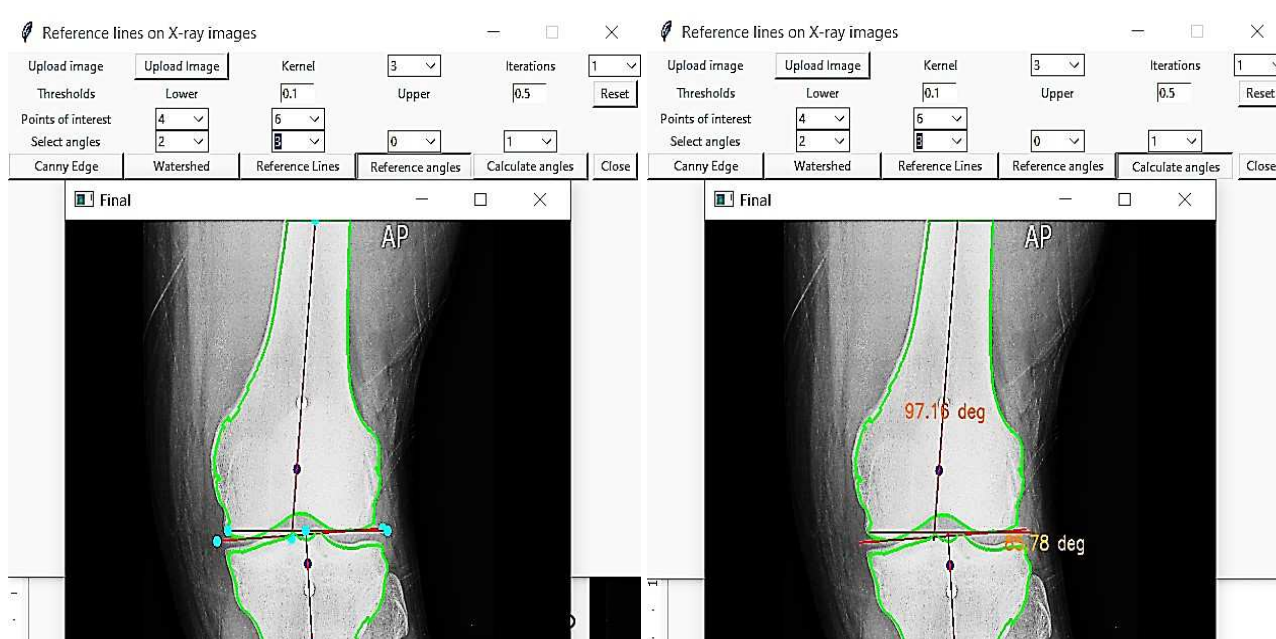


Рис. 4. Результаты работы по улучшению метода построения референтных линий и углов на рентгеновских снимках / Fig. 4. Results of the work improving the method of constructing reference lines and angles on X-ray images

Заключение

Приведены результаты исследований, связанных с алгоритмом построения референтных линий и углов для обработки рентгеновских снимков коленного сустава. Предлагаемый алгоритм включает этапы по улучшению изображения на рентгенограммах, в том числе модифицированный детектор границ Кэнни, алгоритм сегментации, расширение, идентификацию опорной линии и др.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов показывают, что использование алгоритма дает эффект повышения качества диагностики и выработки методов лечения пораженных участков кости.

Данная работа является продолжением проведенного ранее исследования разработок в области определения референтных линий на рентгеновских снимках [2].

Список источников

1. Кулеш П.Н., Соломин Л.Н. Коррекция формы ног по эстетическим показаниям (обзор литературы) // Гений ортопедии. 2013. № 2. С. 117–123.
2. Маннаа А.С., Муратова Г.В. Улучшенный гауссовый фильтр в алгоритме Кэнни для рентгеновских снимков // Инженерный вестн. Дона. 2021. № 10. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7227> (дата обращения: 17.10.2021).
3. Аль Темими А.М.С., Пилиди В.С. Автоматизация процесса определения референтных линий на рентгенографических медицинских изображениях // Инженерный вестн. Дона. 2017. № 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4007> (дата обращения: 27.02.2017).
4. Canny J.A. Computational Approach to Edge Detection IEEE // Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1986. URL: https://www.researchgate.net/publication/224377985_A_Computational_Approach_To_Edge_Detection (дата обращения: 20.02.2017).
5. Jassam Kh.I. Removal of Random Noise from Conventional Digital X-Ray Images. University of Maine Orono, 1992. 114 p.
6. Li Junshan, Ma Ying, Zhao Fangzhou [et al.]. Improved Canny Image Edge Detection Algorithm // Acta Photonica Sinica. 2011. Vol. 40(s1). P. 50–54.
7. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 813 p.
8. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
9. Meyer F. Color image segmentation // IEE International Conference on Image Processing and its Applications. Maastricht, Netherlands, 1995. P. 303–306.

References

1. Kulesh P.N., Solomin L.N. Correction of leg shape according to aesthetic indications (literature review). *Genii ortopedii = Orthopaedic Genius*. 2013;(2):117-123. (In Russ.).
2. Manna A.S., Muratova G.V. Improved Gaussian filter in the Canny algorithm for X-ray images. *Inzhenernyi vestn. Dona = Engineering Journal of Don*. 2021;(10). Available from: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7227> [Accessed 17th October 2021]. (In Russ.).
3. Al Temimi A.M.S., Pilidi V.S. Automation of the process of determining reference lines on radiographic medical images. *Inzhenernyi vestn. Dona = Engineering Journal of Don*. 2017;(1). Available from: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4007> [Accessed 27th February 2017]. (In Russ.).
4. Canny J.A. Computational Approach to Edge Detection IEEE. *Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1986. Available from: https://www.researchgate.net/publication/224377985_A_Computational_Approach_To_Edge_Detection [Accessed 20th February 2017].
5. Jassam Kh.I. *Removal of Random Noise from Conventional Digital X-Ray Images*. University of Maine Orono Press; 1992. 114 p.
6. Li Junshan, Ma Ying, Zhao Fangzhou et al. Improved Canny Image Edge Detection Algorithm. *Acta Photonica Sinica*. 2011;40(s1):50-54.
7. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital image processing*. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall Publ.; 2002. 813 p.
8. Gonzalez R., Woods R. *Digital image processing*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2005. 1072 p. (In Russ.).
9. Meyer F. Color image segmentation. *IEE International Conference on Image Processing and its Applications*. Maastricht, Netherlands, 1995:303-306.

Информация об авторах

А.С. Маннаа – аспирант, кафедры информатики и вычислительного эксперимента, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Г.В. Муратова – доктор физико-математических наук, профессор, кафедры информатики и вычислительного эксперимента, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

A.S. Mannaa - Postgraduate Student, Department of Informatics and Computational Experiment, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

G.V. Muratova - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Informatics and Computational Experiment, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

Статья поступила в редакцию 02.02.2023; одобрена после рецензирования 28.02.2023; принята к публикации 19.05.2023.

The article was submitted 02.02.2023; approved after reviewing 28.02.2023; accepted for publication 19.05.2023.

Научная статья

УДК 514.764.2

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-21-28

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОДОЛЖЕНИЕ РИМАНОВЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ МНОГООБРАЗИЙ МАЛОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Владимир Александрович Попов

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия
vlapopov@gmail.com

Аннотация. Рассматривается аналитическое продолжение локально заданной римановой аналитической метрики до непродолжаемого риманова аналитического многообразия. Таких продолжений необозримое множество, и большинство из них очень неестественно. Поиск наиболее естественных продолжений приводит к обобщению понятия полноты риманова многообразия.

Для метрик, алгебра Ли векторных полей Киллинга которых не имеет центра, возможно аналитическое продолжение до сжатого многообразия. Сжатое многообразие – это универсально притягивающий объект в категории всех локально изометричных римановых аналитических многообразий. Морфизмами этой категории являются локально изометрические отображения $f: M \setminus S$, где S – множество неподвижных точек всех сохраняющих ориентацию и векторные поля Киллинга локальных изометрий M в себя.

Для произвольного класса локально изометричных римановых аналитических многообразий приводится определение псевдополного многообразия. В отличие от сжатого многообразия псевдополное многообразие является полным в случае, если полное многообразие в данном классе существует. Риманово аналитическое односвязное многообразие M называется псевдополным, если оно обладает следующими свойствами. M непродолжаемо. Не существует локально изометрического накрывающего отображения $f: M \rightarrow N$, где N – односвязное риманово аналитическое многообразие, а $f(M)$ – открытое подмножество в N , не равное N . В отличие от сжатых многообразий псевдополное многообразие не является единственным в классе локально изометричных римановых аналитических многообразий. Среди псевдополных многообразий выделяются наиболее сжатые правильные псевдополные многообразия.

Приводится классификация псевдополных многообразий размерности 2 и 3.

Ключевые слова: риманово аналитическое многообразие, алгебра Ли и группа Ли, векторное поле Киллинга, аналитическое продолжение

Для цитирования: Попов В.А. Аналитическое продолжение римановых аналитических многообразий малой размерности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 21–28.

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

Original article

ANALYTIC EXTENSION OF RIEMANNIAN ANALYTIC MANIFOLDS OF SMALL DIMENSION

Vladimir A. Popov

Financial University under the Government of Russian Federation, Moscow, Russia
vlapopov@gmail.com

© Попов В.А., 2023

Abstract. An analytic extension of a locally given Riemannian analytic metric to a non-extendable Riemannian analytic manifold is considered. There are an infinite number of such extensions, and most of these extensions are very unnatural. The search for the most natural extensions leads to a generalization of the concept of completeness of a Riemannian manifold.

It is possible to define a so called compressed manifold for metrics whose Lie algebra of Killing vector fields has no center. It is a universally attracting object in the category of all locally isometric Riemannian analytic manifolds. Morphisms of this category are locally isometric mappings $f: M \setminus S$, where S is the set of fixed points of all local isometries of M into itself that preserve orientation and Killing vector fields.

For an arbitrary class of locally isometric Riemannian analytic manifolds, a definition of a pseudocomplete manifold is given. In contrast to a contracted manifold, a pseudocomplete manifold is complete if a complete manifold exists in the given class. A Riemannian analytic simply connected manifold M is called pseudocomplete if it has the following properties. M is non-extendable. There is no locally isometric covering mapping $f: M \rightarrow N$ where N is a simply connected Riemannian analytic manifold, $f(M)$ is an open subset of N not equal to N . In contrast to contracted manifolds, a pseudocomplete manifold is not unique in the class of locally isometric Riemannian analytic manifolds. Among the pseudocomplete manifolds, the most compressed regular pseudocomplete manifolds are defined.

A classification of pseudocomplete manifolds of dimension 2 and 3 is given.

Keywords: Riemannian analytic manifolds, Lie algebra and Lie group, Killing vector field, analytic extension

For citation: Popov V.A. Analytic Extension of Riemannian Analytic Manifolds of Small Dimension. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):21-28. (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

Однозначность аналитического продолжения аналитических функций наводит на мысль об аналитическом продолжении локально заданной римановой метрики до римановой аналитической метрики глобального риманова пространства и тем самым об изучении свойства глобального пространства по локальным свойствам первоначально заданной метрики.

Рассмотрим риманово аналитическое многообразие M и шар $U \subset M$ малого радиуса с центром в некоторой точке $x_0 \in M$. Под аналитическим продолжением локально заданной метрики будем подразумевать любое риманово аналитическое многообразие N , такое, что существует аналитическая изометрия $\varphi: U \rightarrow N$. Поставим задачу найти наиболее естественное аналитическое продолжение данной метрики. Естественным требованием является свойство непродолжаемости искомого многообразия, введённого ещё в классических монографиях С. Хелгасона [1] и Ш. Кобаяси, К. Номидзу [2]. Однако непродолжаемые многообразия могут быть весьма неестественными. Например, односвязная накрывающая правой полуплоскости выколотыми точками $(\frac{1}{n}; \frac{k}{n})$, $k, n \in \mathbb{N}$.

В исследованиях по геометрии римановых пространств в целом, как правило, существенным требованием является полнота рассматриваемого многообразия. Для полного односвязного риманова аналитического многообразия любая изометрия $\varphi: U \rightarrow V$ между двумя связными открытыми подмножествами $U \subset M$, $V \subset M$ аналитически продолжается до изометрии $\varphi: M \rightarrow M$ [1].

Однако в общем случае шар U риманова аналитического многообразия нельзя изометрически вложить в полное риманово аналитическое многообразие, т.е. локально заданная риманова метрика аналитически не продолжается до метрики полного риманова многообразия. Возникает вопрос об обобщении понятия полноты. Естественным обобщением такого рода является непродолжаемость риманова аналитического многообразия. Однако непродолжаемые многообразия могут быть весьма неестественными.

Целью данной работы является определение псевдополного многообразия, являющегося наиболее полным аналитическим продолжением произвольной локально заданной римановой аналитической метрики. Изучается аналитическое продолжение локально заданной римановой метрики. Аналитическое продолжение вполне неоднородной метрики исследовалось в диссертации Д.Х. Смита [3]. Рассмотрим случай метрики, для которой алгебра Ли всех векторных полей Киллинга не имеет центра. В этом случае существует единственное аналитическое продолжение локально заданной римановой аналитической метрики до метрики сжатого многообразия M , обладающего свойством продолжаемости всех локальных изометрий $f: U \rightarrow V$, где U, V – связные

открытые подмножества многообразия M , до изометрии $f: M \rightarrow M$. Ориентированное риманово аналитическое многообразие, алгебра векторных полей которого имеет нулевой центр, называется сжатым, если оно непродолжаемо и не допускает нетривиальных сохраняющих ориентацию и все векторные поля Киллинга локальных изометрий в себя. Однако квазиполное многообразие обладает не только тем недостатком, что оно определено не для произвольной локально заданной метрики, но оно в определённом смысле не является самым полным. Поэтому далее для произвольной локально заданной римановой метрики мы приведём понятие псевдополного многообразия, исследуем его свойства и связь со сжатым многообразием.

Приведем определение псевдополного многообразия, приводящее к наиболее полному продолжению локально заданной метрики и применимое к произвольной локально заданной метрике. Риманово аналитическое односвязное ориентированное многообразие M называется псевдополным, если оно обладает следующими свойствами. M непродолжаемо. Не существует локально изометрического сохраняющего ориентацию накрывающего отображения $f: M \rightarrow N$, где N – односвязное риманово аналитическое многообразие; $f(M)$ – открытое подмножество в N , не равное N . Среди псевдополных многообразий выделим наиболее симметричные правильные псевдополные.

Псевдополные многообразия определяются для любой локально заданной метрики, однако в отличие от сжатого многообразия не обладают свойством единственности. Изучим связь между псевдополными и сжатыми многообразиями. Для малых размерностей ($\dim M = 2, \dim M = 3$) приведем классификацию псевдополных многообразий.

Основные определения. Сжатые и псевдополные многообразия

Класс всех локально изометричных римановых аналитических многообразий будем называть также классом многообразий, происходящих из данного ростка риманова аналитического многообразия, а конкретное многообразие из этого класса – аналитическим продолжением данного ростка. Естественным требованием к аналитическому продолжению ростка является непродолжаемость полученного многообразия. Перейдем к точным определениям и формулировкам.

Определение 1. Аналитическим продолжением риманова аналитического многообразия M назовём риманово аналитическое многообразие N , такое, что существует аналитическое вложение M в N как собственного открытого подмножества. Многообразие, не допускающее аналитического продолжения, называется непродолжаемым.

Определение 2. Локальной изометрией между двумя римановыми аналитическими многообразиями M и N называется изометрия $\varphi: U \rightarrow V$ между открытыми подмножествами $U \subset M, V \subset N$. Многообразия, между которыми существует локальная изометрия, назовём локально изометричными.

Любое векторное поле $X \in \mathfrak{g}$ аналитически продолжается вдоль любой кривой на многообразии M , и тем самым алгебра Ли \mathfrak{g} определяет алгебру Ли \mathfrak{g} векторных полей Киллинга на любом односвязном многообразии N , локально изометричном M . Этот факт верен также для многообразий аффинной связности.

Лемма 1. Пусть M – аналитическое многообразие аффинной связности; X – инфинитезимальное аффинное преобразование, заданное в области $U \subset M$; $\gamma(t)$ ($0 \leq t \leq 1$) – такая непрерывная кривая в M , что $\gamma(0) \in U$. Тогда векторное поле X аналитически продолжается вдоль γ . Если кривые $\gamma(t)$ и $\delta(t)$ ($0 \leq t \leq 1, \gamma(0) = \delta(0), \gamma(1) = \delta(1) = x_1$) гомотопны, то продолжения векторных полей в точку x_1 вдоль этих кривых совпадают [4].

В случае, когда алгебра Ли всех векторных полей Киллинга для заданной локально определённой римановой аналитической метрики не имеет центра, можно построить так называемое сжатое многообразие, обладающее свойством максимальной симметрии и единственности в классе всех локально изометричных многообразий. Такие многообразия изучались в [5, 6].

Определение 3. Ориентированное риманово аналитическое многообразие, алгебра Ли всех векторных полей которого имеет нулевой центр, называется сжатым, если оно непродолжаемо и не допускает нетривиальных сохраняющих ориентацию и все векторные поля Киллинга локальных изометрий в себя.

Теорема 1. Произвольное риманово аналитическое многообразие M , алгебра Ли векторных полей Киллинга которого не имеет центра, локально изометрично сжатому многообразию [4].

Теорема 2. Пусть φ – локальная изометрия из сжатого многообразия M в сжатое многообразие N . Тогда φ продолжается до изометрии $\varphi: M \approx N$ [4].

Следствие 1. Произвольное риманово аналитическое многообразие, алгебра Ли всех векторных полей Киллинга которого не имеет центра, локально изометрично единственному сжатому многообразию. То есть локально заданная риманова аналитическая метрика, алгебра Ли векторных полей Киллинга которой не имеет центра, единственным образом продолжается до сжатого многообразия [4].

Следствие 2. Пусть \mathfrak{g} – алгебра Ли всех векторных полей Киллинга в римановом аналитическом многообразии M' , диффеоморфном шару, а \mathfrak{h} – ее стационарная подалгебра; G – односвязная группа, порождённая алгеброй \mathfrak{g} ; H – её подгруппа, порождённая подалгеброй \mathfrak{h} . Если \mathfrak{g} не имеет центра, то H замкнута в G [5, 6].

Отметим, что сжатое многообразие является универсально притягивающим объектом в категории всех локально изометричных многообразий. То есть для любого риманова аналитического многообразия M' , алгебра векторных полей Киллинга которого не имеет центра, существует локально изометрическое отображение из $M' \setminus S'$ в квазиполное многообразие M , определенное на всем $M' \setminus S'$, где S' – множество неподвижных точек всех сохраняющих ориентацию и векторные поля Киллинга локальных изометрий многообразия M' .

Однако понятие сжатого многообразия обладает не только тем недостатком, что оно определено не для всех локально заданных римановых аналитических метрик, но оно также не является в определённом смысле самым полным. А именно существует росток риманова аналитического многообразия, допускающий продолжение до полного многообразия, каноническое продолжение которого до сжатого многообразия не является полным многообразием.

Пример 1. Рассмотрим эллипсоид в трёхмерном пространстве, заданный уравнением $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$. Для того чтобы получить сжатое многообразие в классе всех римановых аналитических многообразий, локально изометричных эллипсоиду, необходимо выбросить из эллипсоида 6 точек пересечения с осями координат и профакторизовать полученное многообразие по группе вращений на 180° вокруг всех осей координат.

Дать обобщение понятия полноты, приводящее к самому полному многообразию для произвольного ростка риманова аналитического многообразия, оказывается возможным.

Определение 4. Риманово аналитическое односвязное многообразие M называется псевдополным, если оно обладает следующими свойствами:

1. M непродолжаемо.
2. Не существует локально изометрического накрывающего отображения $f: M \rightarrow N$, где N – односвязное риманово аналитическое многообразие; $f(M)$ – открытое подмножество в N , не равное N .

Исследуем аналитическое продолжение до псевдополного многообразия для различных классов ростков римановых аналитических многообразий. Прежде всего, следует установить тот факт, что аналитическое продолжение до псевдополного многообразия существует для любого ростка риманова аналитического многообразия. Вместе с тем в общем случае это продолжение не единственно, однако различные аналитические продолжения одного и того же ростка различаются не очень значительно.

Теорема 3. Любое локально заданное риманово аналитическое многообразие допускает аналитическое продолжение до псевдополного многообразия. Если в классе локально изометричных римановых аналитических многообразий имеется полное многообразие, то это многообразие является единственным псевдополным многообразием в этом классе.

Псевдополное многообразие не единственно в классе всех локально изометричных римановых аналитических многообразий.

Пример 2. Рассмотрим росток \mathcal{A} двумерного риманова аналитического многообразия, носителем которого является сфера с метрикой $ds^2 = \frac{f(z, \bar{z})}{\sqrt{1+|z|^2}} dzd\bar{z}$, где $f(z, \bar{z})$ – аналитическая функция на сфере, удовлетворяющая условию $f(z, \bar{z}) \neq |A'(z)|^2 f(A(z), A(\bar{z}))$ для любого дробно-линейного преобразования $A(z)$.

Такая метрика имеет особенность в точке $z = \infty$. Сфера с данной метрикой является псевдополным многообразием. Устраним особенность в точке $z = \infty$ при помощи преобразования $z = w^2 + a$, $a \in \mathbb{C}$. В результате получим сферу, двулистно накрывающую первоначальную и

имеющую метрику $ds^2 = \frac{4|w|^2 f(w^2 + a, \bar{w}^2 + \bar{a})}{\sqrt{1+|w^2+a|^2}} dw d\bar{w}$. Эта метрика имеет особенность в точке $w = 0$, что является естественным, так как сфера w ветвится над сферой z в точке $z = a$, соответствующей точке $w = 0$. При различных a получаем различные псевдополные многообразия с координатой w .

Как показывает пример 2, имеется большое множество не очень естественных псевдополных многообразий. С целью избежать разветвления над регулярными точками сузим понятие псевдополного многообразия.

Определение 5. Риманово аналитическое односвязное многообразие M называется правильным псевдополным многообразием, если не существует накрывающего локально изометрического отображения $f: M \setminus S \rightarrow N$ в другое псевдополное многообразие N , локально изометричное многообразию M .

На многообразии $M \setminus S$ рассмотрим распределение \mathfrak{z}^\perp , состоящее из векторов, перпендикулярных центру \mathfrak{z} алгебры Ли \mathfrak{g} всех векторных полей Киллинга.

Теорема 4. Пусть M – псевдополное риманово аналитическое многообразие; \mathfrak{z}^\perp – распределение касательных векторов, перпендикулярных центру \mathfrak{z} алгебры всех векторных полей Киллинга; S – множество неподвижных точек, сохраняющих ориентацию и все векторные поля Киллинга локальных изометрий. Если \mathfrak{z}^\perp инволютивно, то односвязная накрывающая $\overline{M \setminus S}$ многообразия $M \setminus S$ изометрична прямому произведению евклидова пространства и односвязной накрывающей \overline{K} вполне геодезического подмногообразия $K \subset M$, касательного к \mathfrak{z}^\perp , $\overline{M \setminus S} \approx \mathbb{R}^k \times \overline{K}$.

Доказательство. Ввиду инволютивности распределений \mathfrak{z} и \mathfrak{z}^\perp некоторая окрестность U отмеченной точки $p \in M$ имеет вид $U = V \times W$, где V – открытое подмножество интегрального подмногообразия распределения \mathfrak{z} ; W – открытое подмножество интегрального подмногообразия распределения \mathfrak{z}^\perp . Пусть x^1, x^2, \dots, x^k – координаты на V , а y^1, y^2, \dots, y^m – координаты на W . Тогда в координатах $x^1, x^2, \dots, x^k, y^1, y^2, \dots, y^m$ компоненты g_{ij} не зависят от x^1, x^2, \dots, x^k , и так как подмногообразия V и W перпендикулярны, то компоненты при $dx^i dy^j$ равны 0. Поэтому метрика на U имеет вид $ds^2 = ds_1^2(y) + f_{ij}(y) dx^i dx^j$. Вследствие непродолжаемости псевдополного многообразия $M \setminus S$ содержит полные интегральные подмногообразия распределения \mathfrak{z} , т.е. прямые произведения евклидова пространства и тора $\mathbb{R}^s \times T^l$. Поэтому $M \setminus S$ является расслоением над $K' \subset K$ со слоями $\mathbb{R}^s \times T^l$. Так как распределение \mathfrak{z}^\perp инволютивно, это расслоение содержит сечение K' , и поэтому тривиально, $M \setminus S = \mathbb{R}^s \times T^l \times K'$. Так как M непродолжаемо, то $K' = K$. Следовательно, односвязная накрывающая многообразия $M \setminus S$ изометрична прямому произведению односвязных пространств, $\overline{M \setminus S} \approx \mathbb{R}^k \times \overline{K}$.

Следствие. Рассмотрим риманово аналитическое многообразие M' размерности n , алгебра Ли \mathfrak{g} которого коммутативна, т.е. совпадает со своим центром \mathfrak{z} и $\dim \mathfrak{g} = \dim \mathfrak{z} = n - 1$. Тогда существует не более двух псевдополных многообразий, локально изометричных M' .

Доказательство. Так как $\text{codim} \mathfrak{z} = 1$, то $\dim \mathfrak{z}^\perp = 1$ и \mathfrak{z}^\perp инволютивно. По теореме 4 для псевдополного многообразия M , локально изометричного многообразию M' , имеет место разложение $M \setminus S = \mathbb{R}^s \times T^l \times K$. Вполне геодезическое подмногообразие K изометрично прямой \mathbb{R} , или окружности S^1 , или лучу $(a; \infty)$, или интервалу $(a; b)$. Рассмотрим фактор-множество $\overline{K} = M/Z(M)$. Если $K = \mathbb{R}$ или $K = S^1$, то $\overline{K} = K$. Если $K = (a; \infty)$, то $\overline{K} = [a; \infty)$, или $\overline{K} = K = (a; \infty)$. Если $K = (a; b)$, то $\overline{K} = [a; b)$, или $\overline{K} = (a; b]$, или $\overline{K} = [a; b]$, или $\overline{K} = K = (a; b)$.

В случае, если $K = \mathbb{R}$ или $K = S^1$, соответствующий росток риманова аналитического многообразия имеет единственное продолжение до псевдополного многообразия, и это многообразие изометрично евклидовому пространству. Продолжение ростка до псевдополного многообразия будет единственным в случае $S = \emptyset$, т.е. $\overline{K} = K$.

Пусть $K = (a; \infty)$, а $\overline{K} = [a; \infty)$. Тогда точки подмножества $S \subset M$ отображаются при факторизации $\overline{K} = M/Z(M)$ в точку $a \in \overline{K}$. Точка $x \in S$ является особой точкой некоторого поля $X \in \mathfrak{z}$, $X(x) = 0$, а любая изометрия φ из M в себя такая, что $\varphi(x) = x$, имеет вид $\varphi = \text{Exp} Y$, $Y \in \mathfrak{z}$. Рассмотрим подалгебру $\mathfrak{z}_0 \subset \mathfrak{z}$, состоящую из векторных полей Киллинга $X \in \mathfrak{z}$, обращающихся в ноль в точке x , $X(x) = 0$. Тогда \mathfrak{z}_0 порождает группу изометрий некоторого шара B , аналитически продолжающуюся до группы изометрий многообразия M и изоморфную фактор-группе

группы $\mathfrak{z}_0 = \mathbb{R}^s$ по некоторой решётке Γ , действующей на многообразии M . Тогда M является полным многообразием, изометричным пространству $\mathbb{R}^s \times T^l$. Аналогичная конструкция применима к случаю, когда $K = (a; b)$, а $\bar{K} = [a; b]$ или $\bar{K} = (a; b]$, т. е. когда \bar{K} получается из K присоединением одной точки a или b . В этом случае псевдополное многообразие также единственно и изометрично многообразию $\mathbb{R}^s \times T^l \times \bar{K}$; однако это многообразие уже не является полным.

Пусть $K = (a; b)$, $\bar{K} = [a; b]$, т.е. \bar{K} получается из K присоединением двух точек a и b . Рассмотрим псевдополное многообразие M_1 и точки множества $S_1 \subset M_1$, проектирующиеся в точку $a \in \bar{K}$. Тогда так же, как и в предыдущих случаях, многообразие M'_1 получается присоединением множества S_1 к фактор-многообразию многообразия $M \setminus S$ по некоторой решетке $\Gamma_1 \subset \mathfrak{z} = \mathbb{R}^{n-1}$ так, что $M'_1 = \mathbb{R}^s \times T^l \times \bar{K}_1$, где $\bar{K}_1 = [a; b]$. Аналогично рассмотрим псевдополное многообразие M_2 и точки множества $S_2 \subset M_2$, проектирующиеся в точку $b \in \bar{K}$. Многообразие M'_2 получается присоединением множества S_2 к фактор-многообразию многообразия $M \setminus S$ по некоторой решетке $\Gamma_2 \subset \mathfrak{z} = \mathbb{R}^{n-1}$ так, что $M'_2 = \mathbb{R}^s \times T^l \times \bar{K}_2$, где $\bar{K}_2 = (a; b]$. Если решётки Γ_1 и Γ_2 не совпадают, то многообразия $M_1 = M'_1$ и $M_2 = M'_2$ являются двумя различными псевдополными многообразиями. Если же решетки Γ_1 и Γ_2 совпадают, то многообразия M_1 и M_2 изометричны и определяют полное многообразие $M = M_1 = M_2$.

Псевдополные римановы аналитические многообразия малых размерностей

Рассмотрим росток \mathcal{A} двумерного риманова вещественно-аналитического многообразия. Алгебра Ли \mathfrak{g} векторных полей Киллинга двумерного многообразия имеет размерность не больше чем 3. Если $\dim \mathfrak{g} = 3$, то \mathcal{A} является ростком многообразия постоянной кривизны и продолжается до полного многообразия – сферы, плоскости или гиперболической плоскости. Если $\dim \mathfrak{g} = 2$, то \mathcal{A} – росток левоинвариантной римановой метрики на двумерной группе Ли, которая и будет продолжением данного ростка до полного многообразия. Случай $\dim \mathfrak{g} = 1$ описан в только что доказанном следствии к теореме 4.

Пусть имеем вполне неоднородные двумерные римановы аналитические многообразия. Фактор-многообразие K , построенное ранее как объединение всех фактор-многообразий, локально изометричных друг другу по псевдогруппе всех локальных изометрий, сохраняющих все векторные поля Киллинга и ориентацию, является квазиполным многообразием. Множество $\bar{K} = K \cup T$ получается присоединением к многообразию K образов точек $x \in S \subset M_\alpha$ при фактор-отображениях $\pi: M_\alpha \rightarrow M_\alpha/Z(M_\alpha) = \bar{K}_\alpha \subset \bar{K}$, заданных на всевозможных аналитических продолжениях M_α ростка \mathcal{A} . Тогда подмножество $T \subset \bar{K}$ состоит из изолированных точек, и на \bar{K} можно ввести структуру аналитического многообразия. Рассмотрим точку $z_0 \in T \subset \bar{K}$. Тогда существует достаточно малый шар U_0 с центром в точке $x_0 \in U_0$, такой, что фактор-отображение $\pi: U_0 \rightarrow \bar{K}$ является факторизацией шара U_0 по конечной группе вращений с центром в $x_0 \in U_0$, $\pi(x_0) = z_0$. Пусть z – комплексная координата на U_0 , такая, что точка x_0 имеет координату 0. Тогда отображение π имеет вид $z \rightarrow w = z^m$, а метрика на множестве $V_0 = \pi(U_0) \subset \bar{K}$ имеет вид $ds^2 = |w|^{-2(m-1)/m} ds_1^2(w; \bar{w})$, где $ds_1^2(w; \bar{w})$ – аналитическая риманова метрика на шаре $V_0 \subset \bar{K}$.

Обозначим через \tilde{K} односвязную накрывающую множества \bar{K} . Тогда прообразом $\tilde{T} \subset \tilde{K}$ множества $T \subset \bar{K}$ является дискретное множество точек $a_i \in \tilde{K}$. На $\tilde{K} \setminus \tilde{T}$ однозначно определяется аналитическая риманова метрика так, что накрытие будет локально изометричным. Тогда метрика в окрестностях точек a_i имеет вид $ds^2 = |w|^{-2(m-1)/m} ds_1^2(w; \bar{w})$, если комплексная координата w выбрана так, что точка a_i имеет координату 0. Односвязное многообразие \tilde{K} диффеоморфно комплексной плоскости, кругу или сфере.

Пусть \tilde{K} отождествляется с комплексной плоскостью \mathbb{C} . Тогда существует функция Вейерштрасса $f(z) = \prod_{i=1}^{\infty} m_i \sqrt{1 - \frac{z}{a_i}} e^{\frac{1}{m_i} \left(\frac{z}{a_i} + \frac{1}{2} \left(\frac{z}{a_i} \right)^2 + \dots + \frac{1}{p_i} \left(\frac{z}{a_i} \right)^{p_i} \right)}$, голоморфная на $\tilde{K} \setminus \tilde{T}$ и имеющая ветвление порядка m_i в точках a_i . Числа $p_i \in \mathbb{N}$ таковы, что $\forall z \in \mathbb{C}$ сходится ряд $\sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{z}{a_i} \right)^{p_i}$. Рассмотрим риманову поверхность M функции $f(z)$. Поверхность M накрывает комплексную плоскость \mathbb{C} так, что накрывающее отображение $\pi: M \rightarrow \mathbb{C}$ имеет ветвление порядка m_i над точками

$a_i \in \mathbb{C}$ и не разветвлено в остальных точках. Определим риманову метрику на M , положив $g(X; Y) = g(\pi_*X; \pi_*Y)$, где $X, Y \in T_xM$, $\pi_*X, \pi_*Y \in T_{\pi(x)}K$. Эта метрика не имеет особенностей в точках $x_i \in M$, таких, что $\pi(x_i) = a_i$. Легко доказать, что для любого односвязного многообразия N , локально изометричного M , любая локальная изометрия φ из N в M аналитически продолжается до локально изометрического отображения $\varphi: N \rightarrow M$. Таким образом, M является единственным аналитическим продолжением данного ростка до псевдополного многообразия.

В случае, если \tilde{K} – круг, аналогично случаю комплексной плоскости строится единственное аналитическое продолжение данного ростка до псевдополного многообразия. Это многообразие также является римановой поверхностью голоморфной функции $f(z)$ на \tilde{K} , имеющей ветвление

порядка m_i над точками $a_i \in \tilde{T} \subset \tilde{K}$. $f(z) = \prod_{i=1}^{\infty} m_i \sqrt{\frac{z-a_j}{z-a_i}} e^{\sum_{k=1}^{q_i} \frac{(a_j-a_i)^k}{k(z-a_i)^k}}$, где a_j – точка на границе круга, ближайшая к a_i , а числа $q_i \in \mathbb{N}$ таковы, что $\left| \ln \frac{z-a_j}{z-a_i} + \sum_{k=1}^{q_i} \frac{(a_j-a_i)^k}{k(z-a_i)^k} \right| < \frac{1}{2^i}$.

Пусть \tilde{K} – сфера. Здесь множество $\tilde{T} \subset \tilde{K}$ состоит из конечного числа точек $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_l$, в каждой из которых метрика имеет особенность вида $ds^2 = |w|^{-2(m-1)/m} ds_1^2(w; \bar{w})$. Функция $f(z) = \prod_{i=1}^l m_i \sqrt{\frac{z-a_i}{z-\alpha_0}}$ на сфере имеет ветвление порядка m_i в точках $a_i, i = 1, 2, \dots, l$ и порядка m в точке α_0 . Так же, как и выше, рассмотрим риманову поверхность M функции $f(z)$. Накрывающее отображение $\pi: M \rightarrow \tilde{K} = S^2$ является накрытием над $\tilde{K} \setminus \tilde{T}$ и имеет ветвление порядка m_i над точками $a_i \in \tilde{T} \subset \tilde{K}, i = 1, 2, \dots, l$, и ветвление некоторого порядка m в точке α_0 . Тогда метрика на M , индуцированная метрикой на \tilde{K} и накрывающим отображением π , не имеет особенностей в точках $\pi^{-1}(a_i)$, если $m \neq m_0$, и имеет особенность в точке $\pi^{-1}(\alpha_0)$. Полученное многообразие является правильным псевдополным многообразием. Вместо точки $a_0 \in \tilde{T} \subset \tilde{K}$ можно взять любую другую точку $a_j \in \tilde{T} \subset \tilde{K}$ и построить описанным выше способом другое правильное псевдополное многообразие. Таким образом мы получим все аналитические продолжения до псевдополного многообразия данного ростка.

Перейдём к описанию трёхмерных псевдополных многообразий. По-прежнему будем обозначать через \mathfrak{z} центр алгебры Ли \mathfrak{g} всех векторных полей Киллинга на рассматриваемых многообразиях. Если $\dim \mathfrak{z} = 3$, то росток риманова многообразия является однородным и, согласно результату из [4], продолжается до однородного многообразия. Если $\dim \mathfrak{z} = 2$, то, согласно доказанному следствию из теоремы 4, существует не более двух аналитических продолжений данного ростка до правильного псевдополного многообразия. Случай, когда алгебра \mathfrak{g} не имеет центра, $\dim \mathfrak{z} = 0$, разобран при доказательстве теоремы 4.

Пусть $\dim \mathfrak{z} = 1$. Сначала рассмотрим случай, когда \tilde{K} диффеоморфно плоскости, многообразие $M_0 \approx \tilde{K} \times \mathfrak{z}$, U_0 – малый шар, снабженный изначально заданной римановой метрикой на $V_0 = U_0/Z(U_0) \subset \tilde{K}$. Распространим метрику, заданную на U_0 , на многообразие $V_0 \times \mathfrak{z}$. Пусть x^1, x^2, x^3 – координаты на $V_0 \times \mathfrak{z}$ такие, что x^1, x^2 – координаты на V_0 , а x^3 – координата на \mathfrak{z} . Компоненты метрического тензора $g_{ij}(x^1, x^2)$ не зависят от x^3 . Функции $g_{ij}(x^1, x^2)$ аналитически продолжаются вдоль любой кривой на \tilde{K} и задают метрику на $M_0 \approx \tilde{K} \times \mathfrak{z}$. Тогда $M_0/Z(M_0) = K$, следовательно, $Z(M_0) = K \times \Gamma$, где Γ – группа накрытия $\tilde{K} \rightarrow K$. Тогда для правильного псевдополного многообразия M многообразие $M \setminus S = K \times \mathfrak{z}/\Gamma_0$, где Γ_0 – дискретная подгруппа группы \mathfrak{z} .

Рассмотрим теперь случай, когда фактор-многообразие K диффеоморфно сфере. Разобьём K в объединение двух открытых дисков $K = K_1 \cup K_2$. Построим, как и выше, римановы многообразия $M_1 = K_1 \times \mathbb{R}$ и $M_2 = K_2 \times \mathbb{R}$, являющиеся аналитическими продолжениями первоначально заданного ростка, у которых подмногообразия \mathbb{R} являются интегральными кривыми векторного поля $X \in \mathfrak{z}$. Локальные изометрии f из M_1 в M_2 продолжаются вдоль любой кривой на $(K_1 \cap K_2) \times \mathbb{R}$. Если такое продолжение однозначно, получим полное многообразие $M \approx S^2 \times \mathbb{R}$, являющееся продолжением заданного ростка. Предположим теперь, что существует замкнутая кривая $\gamma(t), 0 \leq t \leq 1$, на $(K_1 \cap K_2) \times \mathbb{R}$, продолжение изометрии f вдоль которой неоднозначно, $f(\gamma(0)) = y_1 \neq y_2 = f(\gamma(1))$. Пусть x^1, x^2, x^3 – координаты на M_1 , такие, что x^1, x^2 образуют координаты на K_1 , а x^3 – координата на \mathbb{R} , а y^1, y^2, y^3 – координаты на M_2 , такие, что y^1, y^2 образуют

координаты на K_2 , а y^3 – координата на \mathbb{R} . Так как x^3 и y^3 являются координатами на алгебре Ли \mathfrak{g} , изометрия f в координатах $x^1, x^2, x^3, y^1, y^2, y^3$ имеет вид $y^1 = y^1(x^1, x^2)$, $y^2 = y^2(x^1, x^2)$, $y^3 = x^3 + f(x^1, x^2)$, где y^1, y^2 – функции перехода от карты на K_1 к карте на K_2 на сфере и поэтому однозначны. А функция $f(x^1, x^2)$ неоднозначно продолжается вдоль замкнутой кривой $\delta(t)$, $0 \leq t \leq 1$, на $K_1 \cap K_2$. Пусть $f(\delta(1)) - f(\delta(0)) = a \in \mathbb{R}$. Рассмотрим окружность $S^1 = \mathbb{R}/\mathbb{Z}$. Тогда продолжение функции f вдоль кривой δ будет однозначно, если считать, что f принимает значения не на прямой \mathbb{R} , а на окружности S^1 . Тогда также однозначно будет продолжение функции f вдоль кривых δ^n , $n \in \mathbb{Z}$. Но поскольку любая кривая на $K_1 \cap K_2$ гомотопна кривой δ^n , продолжение функции $f: U_0 \rightarrow S^1$ вдоль всевозможных кривых однозначно на $K_1 \cap K_2$. В таком случае f является функцией перехода расслоения на окружности над сферой S^2 , и мы имеем компактные линзовые пространства в качестве аналитических продолжений заданного ростка.

Заключение

Укажем на возможное развитие рассмотренной в статье тематики. Понятие сжатого многообразия, по-видимому, можно обобщить на псевдоримановы аналитические многообразия. Однако это сопряжено с техническими сложностями. В случае же аффинных аналитических многообразий определение сжатого многообразия теряет смысл ввиду того, что множество неподвижных точек локального аффинного преобразования может иметь коразмерность 1.

Псевдополные многообразия должны быть более детально изучены для произвольных размерностей. Кроме того, определение псевдополного многообразия применимо и к псевдоримановым аналитическим многообразиям, но требует для своего изучения несколько иной техники.

Список источников

1. Хелгасон С. Дифференциальная геометрия и симметрические пространства. М.: Мир, 1964. 534 с.
2. Кобаяси Ш., Номидзу К. Основы дифференциальной геометрии. М.: Наука, 1981. Т. 1. 344 с.
3. Smith G.H. Analytic extension of Riemannian manifolds // Bull. Austral. Math. Soc. 1978. Vol. 18. P. 147–148.
4. Попов В.А. Продолжаемость локальных групп изометрий // Мат. сб. 1988. Т. 135 (177), № 1. С. 45–64.
5. Popov V.A. On the Extendability of Locally Defined isometries of a Pseudo-Riemannian Manifolds // J. of Mathematical Sciences. 2016. Vol. 217, № 5. P. 624–627.
6. Popov V.A. On Closeness of Stationary Subgroup of Affine Transformation Groups // Lobachevskii J. of Mathematics. 2017. Vol. 38, № 4. P. 724–729.

References

1. Helgason S. *Differential geometry and symmetric spaces*. Moscow: Mir Publ.; 1964. 534 p. (In Russ.).
2. Kobayashi Sh., Nomizu K. *Fundamentals of differential geometry*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. Vol. 1. 344 p. (In Russ.).
3. Smith G.H. Analytic extension of Riemannian manifolds. *Bull. Austral. Math. Soc.* 1978;18:147-148.
4. Popov V.A. Extendability of Locally Defined Isometries of a Pseudo-Riemannian Manifold. *Mat. sb. = Sbornik: Mathematics*. 1988;135(1):45-64. (In Russ.).
5. Popov V.A. On the Extendability of Locally Defined isometries of a Pseudo-Riemannian Manifolds. *Journal of Mathematical Sciences*. 2016;217(5):624-627.
6. Popov V.A. On Closeness of Stationary Subgroup of Affine Transformation Groups. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2017;38(4):724-729.

Информация об авторе

В.А. Попов – кандидат физико-математических наук, доцент департамента математики.

Information about the author

V.A. Popov - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor of Department of Mathematics.

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; одобрена после рецензирования 12.01.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 22.12.2022; approved after reviewing 12.01.2023; accepted for publication 19.05.2023.

Научная статья

УДК 62-505

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-29-37

ДИФФЕРЕНЦИРУЕМОСТЬ ФУНКЦИОНАЛА И НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ КРИТЕРИЕМ КАЧЕСТВА ПО ВСЕЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА СО СПЕЦИАЛЬНЫМ ГРАДИЕНТНЫМ СЛАГАЕМОМ

Вугар Ибрагим оглы Салманов

Нахчыванский государственный университет, Нахчыван, Республика Азербайджан
vuqars69@mail.ru

Аннотация. Данная работа посвящена изучению задачи оптимального управления для трехмерного нелинейного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым и с комплексным потенциалом. Управления являются вещественными и мнимыми частями комплексного потенциала и выбираются из класса измеримых ограниченных функций, зависящих от временной переменной. Критерий качества – интеграл по всей области. Отметим, что существование и единственность решения рассматриваемой задачи были ранее исследованы автором. В этой статье изучается дифференцируемость функционала. Дается теорема о единственности сопряженной задачи к поставленной, которая доказывается методом Галёркина. Доказывается теорема о дифференцируемости решения рассматриваемой задачи оптимального управления. Найдена формула для первой вариации критерия качества, с помощью которой устанавливается необходимое условие в виде вариационного неравенства.

Ключевые слова: уравнение Шрёдингера, задача оптимального управления, первая вариация функционала, комплексный потенциал

Для цитирования: Салманов В.И. Дифференцируемость функционала и необходимое условие для решения задачи оптимального управления с интегральным критерием качества по всей области для нелинейного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 29–37.

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

Original article

DIFFERENTIABILITY OF THE FUNCTIONAL AND THE NECESSARY CONDITION TO SOLVE OPTIMAL CONTROL PROBLEM WITH INTEGRAL CRITERION QUALITIES OVER THE ENTIRE DOMAIN FOR A NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH A SPECIAL GRADIENT TERM

Vugar I. Salmanov

Nakhchivan State University, Baku, Republic of Azerbaijan
vuqars69@mail.ru

Abstract. This work is devoted to the study of the optimal control problem for the three-dimensional nonlinear Schrödinger equation with a special gradient term and with a complex potential. The controls are the real and imaginary parts of the complex potential and are selected from the class of measurable bounded functions depending on the time variable, and the performance criterion is an integral over throughout the region is of

© Салманов В.И., 2023

considerable scientific interest. We note that the existence and uniqueness of a solution to an optimal control problem with an integral performance criterion over the entire domain for a nonlinear Schrödinger equation with a special gradient term was previously studied by the author. And in this article, the differentiability of the previously considered problem is studied. A theorem on the uniqueness of the adjoint problem to the stated problem is given, which is proved by the Galerkin method. A theorem on the differentiability of the solution of the optimal control problem under consideration is given and proved. Along with these, a formula is found for the first variation of the quality criterion under consideration and with the help of which a necessary condition is established in the form of a variational inequality.

Keywords: Schrödinger equation, optimal control problem, the first variation of the functional, complex potential

For citation: Salmanov V.I. Differentiability of the Functional and the Necessary Condition to Solve Optimal Control Problem with Integral Criterion Qualities over the Entire Domain for a Nonlinear Schrödinger Equation with a Special Gradient Term. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):29-37. (In Russ.).

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

Задачи оптимального управления для линейного и нелинейного уравнения Шрёдингера часто возникают в квантовой механике, ядерной физике, нелинейной оптике, а также в других областях современной физики и техники, их изучение имеет как теоретический, так и практический интерес [1–3]. Одна из них – о движении заряженных частиц, когда потенциал неизвестен и подлежит определению. Если заряженная частица движется в постоянном однородном магнитном поле, направление которого выбрано вдоль оси z , то её движение происходит в плоскости $(x, y) \in E_2$ и описывается двумерным линейным уравнением Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым [1, с. 82]. Подобные задачи оптимального управления со специальным градиентным слагаемым ранее были изучены в работах [4, 5], для линейного и нелинейного нестационарного уравнений Шрёдингера без специального градиентного слагаемого – в работах [6–11] и др. Однако задачи оптимального управления для нелинейного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым мало исследованы. Для трехмерного нелинейного нестационарного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым и с комплекснозначным потенциалом, зависящим от пространственной и временной переменных с финальным критерием качества, была рассмотрена в работе [12]. Существование и единственность решения с интегральным критерием качества по всей области исследованы в работе [13].

Постановка задачи

Рассмотрим задачу о минимизации функционала

$$J_\alpha(v) = \|\psi_1 - \psi_2\|_{L_2(\Omega)}^2 + \alpha \|v - \omega\|_H^2 \quad (1)$$

на множестве $V = \left\{ v = v(t) = (v_0(t), v_1(t)) : v_m \in W_2^1(0, T), |v_m(t)| \leq b_m, \left| \frac{dv_m(t)}{dt} \right| \leq d_m, m = 0, 1, \forall t \in (0, T) \right\}$

при условиях

$$i \frac{d\psi_p}{dt} + a_0 \Delta \psi_p + ia_1(x, t) \nabla \psi_p - a(x) \psi_p + v_0(t) \psi_p + iv_1(t) \psi_p + a_2 |\psi_p|^2 \psi_p = f_p(x, t), p = 1, 2, (x, t) \in \Omega, \quad (2)$$

$$\psi_p(x, 0) = \varphi_p(x), \quad p = 1, 2, \quad x \in D, \quad (3)$$

$$\psi_1|_S = 0, \quad \frac{\partial \psi_2}{\partial \nu} \Big|_S = 0, \quad (4)$$

где $i = \sqrt{-1}$, $T > 0$, $b_m > 0$, $d_m > 0$, $m = 0, 1$, $a_0 > 0$, $\alpha \geq 0$ – заданные числа; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} -$

оператор Лапласа; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3} \right)$ – оператор набла; ν – внешняя нормаль границы Γ области D ; комплексное число a_2 удовлетворяет условию

$$a_2 = \operatorname{Re} a_2 + i \operatorname{Im} a_2, \operatorname{Re} a_2 < 0, \operatorname{Im} a_2 > 0, \operatorname{Im} a_2 \geq 2|\operatorname{Re} a_2| ; \quad (5)$$

$a(x)$ – измеримая ограниченная функция, удовлетворяющая условию

$$\mu_0 \leq a(x) \leq \mu_1, \forall x \in D, \mu_0, \mu_1 = \operatorname{const} > 0 ; \quad (6)$$

$a_1(x, t) = (a_{11}(x, t), a_{12}(x, t), a_{13}(x, t))$ – заданная вектор-функция, компоненты которой удовлетворяют условиям

$$\left| a_1(x, t) \leq \mu_2, \left| \frac{\partial a_{1j}(x, t)}{\partial x_k} \right| \leq \mu_3, \left| \frac{\partial a_{1j}(x, t)}{\partial t} \right| \leq \mu_4, j, k = \overline{1, 3}, \forall (x, t) \in \Omega, a_1 \Big|_S = 0, \quad (7)$$

$\mu_2, \mu_3, \mu_4 = \operatorname{const} > 0$; $\varphi_p(x), f_p(x, t), p = 1, 2$, – комплекснозначные функции, удовлетворяющие условиям

$$\varphi_1 \in W_2^2(D), \varphi_2 \in W_2^2(D), \frac{\partial \varphi_2}{\partial \nu} \Big|_\Gamma = 0, \quad (8)$$

$$f_p \in W_2^{0,1}(\Omega), p = 1, 2, \quad (9)$$

$\omega \in H$ – заданный элемент, где $H \equiv W_2^1(0, T) \times W_2^1(0, T)$.

Задачу об определении функций $\psi_p = \psi_p(x, t) \equiv \psi_p(x, t; \nu), p = 1, 2$, из (2)–(4) при каждом $\nu \in V$ будем называть редуцированной. Ясно, что она состоит из двух: первой и второй начально-краевых задач для нелинейного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым и с комплексным потенциалом.

Редуцированная задача вида (2)–(4) была изучена в [14]. А в этой работе будем рассматривать дифференцируемость функционала и необходимое условие для решения задачи оптимального управления.

Дифференцируемость функционала и необходимое условие для решения задачи оптимального управления

В этом разделе будет установлено необходимое условие для решения задачи оптимального управления (1)–(4) в виде вариационного неравенства. Пусть $\Phi_p = \Phi_p(x, t), p = 1, 2$, являются решением следующей сопряженной к (2)–(4) задачи:

$$i \frac{\partial \Phi_p}{\partial t} + a_0 \Delta \Phi_p + i \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} (a_{1j}(x, t) \Phi_p) - a(x) \Phi_p + \nu_0(t) \Phi_p - i \nu_1(t) \Phi_p + 2a_2 \overline{|\psi_p|^2} \Phi_p + a_2 (\psi_p)^2 \overline{\Phi_p} = (-1)^p 2(\psi_1(x, t) - \psi_2(x, t)), p = 1, 2, (x, t) \in \Omega, \quad (10)$$

$$\Phi_p(x, T) = 0, p = 1, 2, x \in D, \quad (11)$$

$$\Phi_1 \Big|_S = 0, \frac{\partial \Phi_2}{\partial \nu} \Big|_S = 0, \quad (12)$$

где $\psi_p = \psi_p(x, t) \equiv \psi_p(x, t; \nu), p = 1, 2$, – решение редуцированной задачи (2)–(4) при $\nu \in V$.

Под решением сопряженной задачи (10)–(12) понимаются функции $\Phi_p(x, t), p = 1, 2$, из пространств $B_p, p = 1, 2$, удовлетворяющие уравнениям (10) для $\forall t \in [0, T]$, краевым условиям (11) и (12) для $\forall x \in D$ и $\forall (\xi, t) \in S$ соответственно.

Теорема 1. Пусть число a_2 и функции $a(x), a_1(x, t), \varphi_p(x), f_p(x, t), p = 1, 2$, удовлетворяют условиям (5)–(9), $y \in W_2^0(D)$ – заданная функция. Тогда сопряженная задача (10)–(12) имеет единственное решение из пространства $\Phi_p \in B_p, p = 1, 2$, и для этого решения справедливы оценки

$$\|\Phi_1(\cdot, t)\|_{W_2(D)}^2 + \left\| \frac{\partial \Phi_1(\cdot, t)}{\partial t} \right\|_{L_2(D)}^2 \leq c_5 \|\psi_1 - \psi_2\|_{W_2^{0,1}(\Omega)}^2, \quad (13)$$

$$\|\Phi_2(\cdot, t)\|_{W_2(D)}^2 + \left\| \frac{\partial \Phi_2(\cdot, t)}{\partial t} \right\|_{L_2(D)}^2 \leq c_6 \|\psi_1 - \psi_2\|_{W_2^{0,1}(\Omega)}^2 \quad (14)$$

для $\forall t \in [0, T]$, где $c_5 > 0, c_6 > 0$ – постоянные, не зависящие от t .

Доказательство этой теоремы проводится методом Галёркина.

Для установления необходимого условия для решения оптимального управления (1)–(4) сначала покажем дифференцируемость функционала $J_\alpha(v)$ на множестве V .

Теорема 2. Пусть выполнены условия теоремы 1 и $\omega \in H$ – заданный элемент. Тогда функционал $J_\alpha(v)$ для любой функции $w = w(t)$ из пространства B имеет первую вариацию на множестве V , которая имеет вид

$$\begin{aligned} \delta J_\alpha(v, w) = & \int_{\Omega} \operatorname{Re}(\psi_1(x, t) \bar{\Phi}_1(x, t) + \psi_2(x, t) \bar{\Phi}_2(x, t)) w_0(t) dx dt - \\ & - \int_{\Omega} \operatorname{Im}(\psi_1(x, t) \bar{\Phi}_1(x, t) + \psi_2(x, t) \bar{\Phi}_2(x, t)) w_1(t) dx dt + \\ & + 2\alpha \int_0^T (v_0(t) - \omega_0(t)) w_0(t) dt + \int_0^T \left(\frac{dv_0(t)}{dt} - \frac{d\omega_0(t)}{dt} \right) \frac{dw_0(t)}{dt} dt + \\ & + 2\alpha \int_0^T (v_1(t) - \omega_1(t)) w_1(t) dt + \int_0^T \left(\frac{dv_1(t)}{dt} - \frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) \frac{dw_1(t)}{dt} dt, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\psi_p(x, t) \equiv \psi_p(x, t; v), \Phi_p(x, t) \equiv \Phi_p(x, t; v), p = 1, 2$, – решения редуцированной (2)–(4) и сопряженной (10)–(12) задач при $v \in V$.

Доказательство. Рассмотрим приращение функционала $J_\alpha(v)$ на любом элементе $v \in V$. С помощью (1) и приращения функционала $J_\alpha(v)$ имеем

$$\begin{aligned} \delta J_\alpha(v) = J_\alpha(v + \delta v) - J_\alpha(v) = & 2 \int_{\Omega} \operatorname{Re}[(\psi_1(x, t) - \psi_2(x, t))(\delta \bar{\psi}_1(x, t) - \delta \bar{\psi}_2(x, t))] dx + \\ & + 2\alpha \int_0^T (v_0(t) - \omega_0(t)) v_0(t) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_0(t)}{dt} - \frac{d\omega_0(t)}{dt} \right) \frac{dv_0(t)}{dt} dt + \\ & + 2\alpha \int_0^T (v_1(t) - \omega_1(t)) v_1(t) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_1(t)}{dt} - \frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) \frac{dv_1(t)}{dt} dt + \\ & + \|\delta \psi_1\|_{L_2(\Omega)}^2 + \|\delta \psi_2\|_{L_2(\Omega)}^2 - 2 \int_{\Omega} \operatorname{Re}(\delta \psi_1(x, t) \delta \bar{\psi}_2(x, t)) dx dt + \alpha \|\delta v\|_H^2, \quad \forall v \in V, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\delta \psi_p = \delta \psi_p(x, t), p = 1, 2$, – решение системы начально-краевых задач

$$\begin{aligned} i \frac{\partial \delta \psi_p}{\partial t} + a_0 \Delta \psi_p + ia_1(x, t) \nabla \delta \psi_p - a(x) \delta \psi_p + (v_0(t) + \delta v_0(t)) \delta \psi_p + i(v_1(t) + \delta v_1(t)) \delta \psi_p = \\ = -\delta v_0(t) \psi_p - i \delta v_1(t) \psi_p - a_2 \left(|\psi_{p\delta}|^2 \psi_{p\delta} - |\psi_p|^2 \psi_p \right), \quad p = 1, 2, (x, t) \in \Omega, \end{aligned}$$

$$\delta \psi_p(x, 0) = 0, \quad p = 1, 2, x \in D, \quad \delta \psi_1|_S = 0, \quad \frac{\partial \delta \psi_2}{\partial \nu} \Big|_S = 0.$$

Сначала преобразуем первое слагаемое в правой части этой формулы.

Ясно, что $\delta\psi_p \in B_p, p=1,2$, удовлетворяют следующим интегральным тождествам:

$$\int_{\Omega} \left(i \frac{\partial \delta\psi_p}{\partial t} + a_0 \Delta \delta\psi_p + ia_1(x,t) \nabla \delta\psi_p - a(x) \delta\psi_p + (v_0(t) + \delta v_0(t)) \delta\psi_p \right) \bar{\eta}_p(x,t) dxdt +$$

$$+ i \int_{\Omega} (v_1(t) + \delta v_1(t)) \delta\psi_p \bar{\eta}_p(x,t) dxdt = - \int_{\Omega} \delta v_0(t) \psi_p \bar{\eta}_p(x,t) dxdt -$$

$$- i \int_{\Omega} \delta v_1(t) \psi_p \bar{\eta}_p(x,t) dxdt - \int_{\Omega} a_2 \left[\left(|\psi_{p\delta}|^2 + |\psi_p|^2 \right) \delta\psi_p + \psi_{p\delta} \psi_p \delta \bar{\psi}_p \right] \bar{\eta}_p(x,t) dxdt, \quad p=1,2,$$
(17)

для любых функций $\eta_p \in L_2(\Omega), p=1,2$. Кроме того, решение сопряженной задачи $\Phi_p(x,t), p=1,2$, из $B_p, p=1,2$, также удовлетворяет следующим интегральным тождествам:

$$\int_{\Omega} \left(i \frac{\partial \Phi_p}{\partial t} + a_0 \Delta \Phi_p + i \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} (a_{1j}(x,t) \Phi_p) - a(x) \Phi_p + v_0(t) \Phi_p - iv_1(t) \Phi_p + \right.$$

$$\left. + 2a_2 |\psi_p|^2 \Phi_p + a_2 (\psi_p)^2 \bar{\Phi}_p \right) \bar{\eta}_{1p}(x,t) dxdt = (-1)^p 2 \int_{\Omega} (\psi_1(x,t) - \psi_2(x,t)) \bar{\eta}_{1p}(x,t) dxdt$$

для любых функций $\eta_{1p} \in L_2(\Omega), p=1,2$. В этих интегральных тождествах вместо пробных функций $\eta_{1p}(x,t), p=1,2$, возьмем функции $\delta\psi_p(x,t), p=1,2$, из $B_p, p=1,2$, соответственно. Тогда после применения интегрирования по частям в первом, во втором и в третьем слагаемых левой части полученного равенства с использованием начально-краевых условий вида (12) и (14) получим равенство, комплексное сопряжение которого имеет вид

$$\int_{\Omega} \left(i \frac{\partial \delta\psi_p}{\partial t} + a_0 \Delta \delta\psi_p + ia_1(x,t) \nabla \delta\psi_p - a(x) \delta\psi_p + v_0(t) \delta\psi_p + iv_1(t) \delta\psi_p \right) \bar{\Phi}_p dxdt +$$

$$+ \int_{\Omega} 2a_2 |\psi_p|^2 \delta\psi_p \bar{\Phi}_p dxdt + \int_{\Omega} a_2 (\bar{\psi}_p)^2 \delta\psi_p \bar{\Phi}_p dxdt = (-1)^p 2 \int_{\Omega} (\bar{\psi}_1(x,t) - \bar{\psi}_2(x,t)) \delta\psi_p(x,t) dxdt, \quad p=1,2.$$

В интегральном тождестве (17) $\eta_p(x,t), p=1,2$, заменим на $\Phi_p(x,t), p=1,2$, из $B_p, p=1,2$.

Тогда

$$\int_{\Omega} \left(i \frac{\partial \delta\psi_p}{\partial t} + a_0 \Delta \delta\psi_p + ia_1(x,t) \nabla \delta\psi_p - a(x) \delta\psi_p + (v_0(t) + \delta v_0(t)) \delta\psi_p \right) \bar{\Phi}_p(x,t) dxdt +$$

$$+ i \int_{\Omega} (v_1(t) + \delta v_1(t)) \delta\psi_p \bar{\Phi}_p(x,t) dxdt = - \int_{\Omega} \delta v_0(t) \psi_p \bar{\Phi}_p(x,t) dxdt -$$

$$- i \int_{\Omega} \delta v_1(t) \psi_p \bar{\Phi}_p(x,t) dxdt - \int_{\Omega} a_2 \left[\left(|\psi_{p\delta}|^2 + |\psi_p|^2 \right) \delta\psi_p + \psi_{p\delta} \psi_p \delta \bar{\psi}_p \right] \bar{\Phi}_p(x,t) dxdt, \quad p=1,2.$$
(19)

Вычитая (18) из (19), нетрудно установить справедливость равенства

$$2 \int_{\Omega} \text{Re} \left[(\psi_1(x,t) - \psi_2(x,t)) (\delta \bar{\psi}_1(x,t) - \delta \bar{\psi}_2(x,t)) \right] dxdt = \int_{\Omega} \delta v_0(t) \text{Re} \left(\sum_{p=1}^2 \psi_p \bar{\Phi}_p \right) dxdt -$$

$$- \int_{\Omega} \delta v_1(t) \text{Im} \left(\sum_{p=1}^2 \psi_p \bar{\Phi}_p \right) dxdt + \int_{\Omega} \delta v_0(t) \text{Re} \left(\sum_{p=1}^2 \delta\psi_p \bar{\Phi}_p \right) dxdt -$$

$$- \int_{\Omega} \delta v_1(t) \text{Im} \left(\sum_{p=1}^2 \delta\psi_p \bar{\Phi}_p \right) dxdt + \int_{\Omega} \text{Re} \left(a_2 \sum_{p=1}^2 \psi_{p\delta} \bar{\Phi}_p |\delta\psi_p|^2 \right) dxdt +$$

$$+ \int_{\Omega} \text{Re} \left(a_2 \sum_{p=1}^2 \psi_p \bar{\Phi}_p |\delta\psi_p|^2 \right) dxdt + \int_{\Omega} \text{Re} \left(a_2 \sum_{p=1}^2 \bar{\psi}_p \bar{\Phi}_p (\delta\psi_p)^2 \right) dxdt.$$
(20)

С учетом равенства (20) преобразуем правую часть (16)

$$\begin{aligned} \delta J_\alpha(v) = & \int_{\Omega} \delta v_0(t) \operatorname{Re} \left(\sum_{p=1}^2 \psi_p \bar{\Phi}_p \right) dxdt - \int_{\Omega} \delta v_1(t) \operatorname{Im} \left(\sum_{p=1}^2 \psi_p \bar{\Phi}_p \right) dxdt + \\ & + 2\alpha \int_0^T (v_0(t) - \omega_0(t)) \delta v_0(t) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_0(t)}{dt} - \frac{d\omega_0(t)}{dt} \right) \frac{d\delta v_0(t)}{dt} dt + \\ & + 2\alpha \int_0^T (v_1(t) - \omega_1(t)) \delta v_1(t) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_1(t)}{dt} - \frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) \frac{d\delta v_1(t)}{dt} dt + R(\delta v), \end{aligned}$$

где $R(\delta v) = \int_{\Omega} \delta v_0(t) \operatorname{Re} \left(\sum_{p=1}^2 \delta \psi_p \bar{\Phi}_p \right) dxdt - \int_{\Omega} \delta v_1(t) \operatorname{Im} \left(\sum_{p=1}^2 \delta \psi_p \bar{\Phi}_p \right) dxdt +$

$$+ \int_{\Omega} \operatorname{Re} \left(a_2 \sum_{p=1}^2 \psi_p \delta \bar{\Phi}_p |\delta \psi_p|^2 \right) dxdt + \operatorname{Re} \left(a_2 \sum_{p=1}^2 \psi_p \bar{\Phi}_p |\delta \psi_p|^2 \right) dxdt +$$

$$+ \int_{\Omega} \operatorname{Re} \left(a_2 \sum_{p=1}^2 \bar{\psi}_p \bar{\Phi}_p (\delta \psi_p)^2 \right) dxdt + \alpha \|\delta v\|_H^2 + \sum_{p=1}^2 \|\delta \psi_p\|_{L_2(\Omega)}^2 - 2 \int_{\Omega} \operatorname{Re}(\delta \psi_1 \delta \bar{\psi}_2) dxdt, \quad \forall v \in V.$$

Оценивая слагаемое $R(\delta v)$, с помощью неравенства Коши – Буняковского получим

$$\begin{aligned} |R(\delta v)| \leq & \left(\|\delta v_0\|_{L_\infty(0,T)} + \|\delta v_1\|_{L_\infty(0,T)} \right) \sum_{p=1}^2 \|\Phi_p\|_{L_2(\Omega)} \|\delta \psi_p\|_{L_2(\Omega)} + \\ & + 4|a_2| \sum_{p=1}^2 \left(\|\psi_{p\delta}\|_{L_\infty(\Omega)} + \|\psi_p\|_{L_\infty(\Omega)} \right) \|\Phi_p\|_{L_\infty(\Omega)} \|\delta \psi_p\|_{L_2(\Omega)}^2 + \alpha \|\delta v\|_H^2 + 2 \sum_{p=1}^2 \|\delta \psi_p\|_{L_2(\Omega)}^2. \end{aligned} \quad (21)$$

В силу вложения пространства $W_2^2(D)$ в $L_\infty(D)$ [15] при $n = 3$

$$\begin{aligned} \|\psi_{p\delta}(\cdot, t)\|_{L_\infty(D)} & \leq c_7 \|\psi_{p\delta}(\cdot, t)\|_{W_2^2(D)}, \quad p = 1, 2, \quad \|\psi_p(\cdot, t)\|_{L_\infty(D)} \leq c_8 \|\psi_p(\cdot, t)\|_{W_2^2(D)}, \quad p = 1, 2, \\ \|\Phi_p(\cdot, t)\|_{L_\infty(D)} & \leq c_9 \|\Phi_p(\cdot, t)\|_{W_2^2(D)}, \quad p = 1, 2, \end{aligned}$$

для любого $t \in [0, T]$. Используя следующие оценки для функций $\psi_{p\delta}(x, t), \psi_p(x, t), p = 1, 2$:

$$\begin{aligned} \|\psi_1(\cdot, t)\|_{W_2^2(D)}^2 + \left\| \frac{\partial \psi_1(\cdot, t)}{\partial t} \right\|_{L_2(D)}^2 & \leq c_1 (\|\varphi_1\|_{W_2^2(D)}^2 + \|f_1\|_{W_2^{0,1}(\Omega)}^2 + \|\varphi_1\|_{W_2^1(D)}^6), \quad \forall t \in [0, T], \\ \|\psi_2(\cdot, t)\|_{W_2^2(D)}^2 + \left\| \frac{\partial \psi_2(\cdot, t)}{\partial t} \right\|_{L_2(D)}^2 & \leq c_2 (\|\varphi_2\|_{W_2^2(D)}^2 + \|f_2\|_{W_2^{0,1}(\Omega)}^2 + \|\varphi_2\|_{W_2^1(D)}^6), \quad \forall t \in [0, T], \end{aligned}$$

где $c_p > 0, p = 1, 2$, – постоянные, не зависящие от t , и оценки (13), (14) для функций $\Phi_p(x, t), p = 1, 2$, установим справедливость неравенств

$$\|\psi_{p\delta}\|_{L_\infty(\Omega)} \leq c_{10}, \|\psi_p\|_{L_\infty(\Omega)} \leq c_{11}, \|\Phi_p\|_{L_\infty(\Omega)} \leq c_{12}, \quad p = 1, 2.$$

С учетом этих неравенств, оценки

$$\|\delta \psi_p(\cdot, t)\|_{L_2(D)}^2 + \frac{\operatorname{Im} a_2}{2} \int_{\Omega_t} \left(|\psi_{p\delta}|^2 + |\psi_p|^2 \right) |\delta \psi_p|^2 dxdt \leq c_3 \|\delta v\|_B^2, \quad p = 1, 2, \quad \forall t \in [0, T],$$

где $c_3 > 0$ – постоянная, не зависящая от δv , формул (13), (14), из (21) получим $|R(\delta v)| \leq c_{13} \|\delta v\|_B^2$. Это означает, что $R(\delta v) = o(\|\delta v\|_B)$.

С учетом этого соотношения приращение $J_\alpha(v)$ можем написать в виде

$$\delta J_\alpha(v) = J_\alpha(v + \delta v) - J_\alpha(v) = \int_{\Omega} \delta v_0(t) \operatorname{Re}(\psi_1(x, t) \bar{\Phi}_1(x, t) + \psi_2(x, t) \bar{\Phi}_2(x, t)) dxdt - \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 & - \int_{\Omega} \delta v_1(t) \operatorname{Im}(\psi_1(x, t) \bar{\Phi}_1(x, t) + \psi_2(x, t) \bar{\Phi}_2(x, t)) dx dt + \\
 & + 2\alpha \int_0^T (v_0(t) - \omega_0(t)) v_0(t) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_0(t)}{dt} - \frac{d\omega_0(t)}{dt} \right) \frac{dv_0(t)}{dt} dt + \\
 & + 2\alpha \int_0^T (v_1(t) - \omega_1(t)) v_1(t) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_1(t)}{dt} - \frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) \frac{dv_1(t)}{dt} dt + o(\|\delta v\|_B), \forall v \in V.
 \end{aligned}$$

В этом равенстве вместо $\delta v \in B$ возьмем $\theta w \in B$, где $0 < \theta < 1$ и $w = w(t)$ – любая функция из пространства B . Тогда из (22) имеем

$$\begin{aligned}
 \delta J_{\alpha}(v) & = J_{\alpha}(v + \theta w) - J_{\alpha}(v) = \theta \int_{\Omega} \operatorname{Re}(\psi_1(x, t) \bar{\Phi}_1(x, t) + \psi_2(x, t) \bar{\Phi}_2(x, t)) w_0(t) dx dt - \\
 & - \theta \int_{\Omega} \operatorname{Im}(\psi_1(x, t) \bar{\Phi}_1(x, t) + \psi_2(x, t) \bar{\Phi}_2(x, t)) w_1(t) dx dt + \\
 & + 2\alpha \theta \int_0^T (v_0(t) - \omega_0(t)) w_0(t) dt + 2\alpha \theta \int_0^T \left(\frac{dv_0(t)}{dt} - \frac{d\omega_0(t)}{dt} \right) \frac{dw_0(t)}{dt} dt + \\
 & + 2\alpha \theta \int_0^T (v_1(t) - \omega_1(t)) w_1(t) dt + 2\alpha \theta \int_0^T \left(\frac{dv_1(t)}{dt} - \frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) \frac{dw_1(t)}{dt} dt + o(\theta), \forall v \in V.
 \end{aligned}$$

Вычисляя первую вариацию функционала, получим справедливость следующей формулы:

$$\begin{aligned}
 \delta J_{\alpha}(v, w) & = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{J_{\alpha}(v + \theta w) - J_{\alpha}(v)}{\theta} = \int_{\Omega} \operatorname{Re}(\psi_1(x, t) \bar{\Phi}_1(x, t) + \psi_2(x, t) \bar{\Phi}_2(x, t)) w_0(t) dx dt - \\
 & - \int_{\Omega} \operatorname{Im}(\psi_1(x, t) \bar{\Phi}_1(x, t) + \psi_2(x, t) \bar{\Phi}_2(x, t)) w_1(t) dx dt + \\
 & + 2\alpha \int_0^T (v_0(t) - \omega_0(t)) w_0(t) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_0(t)}{dt} - \frac{d\omega_0(t)}{dt} \right) \frac{dw_0(t)}{dt} dt + \\
 & + 2\alpha \int_0^T (v_1(t) - \omega_1(t)) w_1(t) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_1(t)}{dt} - \frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) \frac{dw_1(t)}{dt} dt, \forall v \in V,
 \end{aligned} \tag{23}$$

для любой функции $w \in B$. Отсюда следует утверждение теоремы.

С помощью теоремы 3 докажем необходимое условие в виде вариационного неравенства.

Теорема 3. Пусть выполнены условия теоремы 2; $v^* \in V$ – любое решение задачи оптимального управления (1)–(3). Тогда для любого $v \in V$ справедливо неравенство

$$\begin{aligned}
 & \int_0^T \left[\int_D \operatorname{Re}(\psi_1^*(x, t) \bar{\Phi}_1^*(x, t) + \psi_2^*(x, t) \bar{\Phi}_2^*(x, t)) dx + 2\alpha(v_0^*(t) - \omega_0(t)) \right] (v_0(t) - v_0^*(t)) dt + \\
 & + \int_0^T \left[\int_D -\operatorname{Im}(\psi_1^*(x, t) \bar{\Phi}_1^*(x, t) + \psi_2^*(x, t) \bar{\Phi}_2^*(x, t)) dx + 2\alpha(v_1^*(t) - \omega_1(t)) \right] (v_1(t) - v_1^*(t)) dt + \\
 & + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_0^*(t)}{dt} - \frac{d\omega_0(t)}{dt} \right) \left(\frac{dv_0(t)}{dt} - \frac{dv_0^*(t)}{dt} \right) dt + 2\alpha \int_0^T \left(\frac{dv_1^*(t)}{dt} - \frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) \left(\frac{dv_1(t)}{dt} - \frac{dv_1^*(t)}{dt} \right) dt \geq 0,
 \end{aligned}$$

где $\psi_p^*(x, t) \equiv \psi_p(x, t; v^*)$, $\Phi_p^*(x, t) = \Phi_p(x, t; v^*)$, $p = 1, 2$, – решение редуцированной начально-краевой (2)–(4) и сопряженной задач (10)–(12) при $v^* \in V$.

Доказательство. Пусть $v \in V$ – произвольный элемент, $v^* \in V$ – произвольное решение задачи оптимального управления (1)–(4). Из структуры множества V ясно, что оно является выпуклым. Поэтому для $v^* \in V$ и любого $v \in V$ имеем $v^* + \theta(v - v^*) \in V, \forall \theta \in (0, 1)$.

Следовательно, для того чтобы $v^* \in V$ была точкой минимума функционала $J_\alpha(v)$ на множестве V , необходимо, чтобы для любого $v \in V$ выполнялось неравенство

$$\left. \frac{d}{d\theta} J_\alpha(v^* + \theta(v - v^*)) \right|_{\theta=0} = \delta J_\alpha(v^*, v - v^*) \geq 0.$$

Отсюда в силу формулы (15) при $w(t) = v(t) - v^*(t)$ получим утверждение теоремы.

Выводы

Доказанные выше и в работе [13] теоремы дают возможность применить численные методы решения некорректных и обратных задач, а также задач оптимального управления с приближенными данными, возникающими при изучении процессов движения заряженных частиц в постоянном однородном магнитном поле, в котором комплекснозначный потенциал является неизвестным и подлежит определению.

Список источников

1. Бутковский А.Г., Самойленко Ю.И. Управление квантово-механическими процессами. М.: Наука, 1984. 256 с.
2. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 366 с.
3. Журавлев В.М. Нелинейные волны в многокомпонентных системах с дисперсией и диффузией. Ульяновск: УлГУ, 2001. 200 с.
4. Akbaba G.D. The optimal control problem with the Lions functional for the Schrödinger equation including virtual coefficient gradient. Master's thesis. Kars, 2011. 71 p. (In Turkish).
5. Yagubov G., Toyoğlu F., Subaşı M. An optimal control problem for two-dimensional Schrödinger equation // Applied Mathematics and Computation. 2012. Vol. 218, iss. 11. P. 6177–6187.
6. Искендеров А.Д., Ягубов Г.Я. Вариационный метод решения обратной задачи об определении квантово-механического потенциала // Докл. АН СССР. 1988. Т. 303, № 5. С. 1044–1048.
7. Искендеров А.Д., Ягубов Г.Я. Оптимальное управление нелинейными квантово-механическими системами // Автоматика и телемеханика. 1989. № 12. С. 27–38.
8. Ягубов Г.Я., Мусаева М.А. Об одной задаче идентификации для нелинейного уравнения Шрёдингера // Диф. уравнения. 1997. Т. 33, № 12. С. 1691–1698.
9. Baudouin L., Kavian O., Puel J.P. Regularity for a Schrodinger equation with singular potentials and application to bilinear optimal control // J. Differential Equations. 2005. Vol. 216. P. 188–222.
10. Искендеров А., Ягубов Г. Оптимальное управление неограниченным потенциалом в многомерном нелинейном нестационарном уравнении Шрёдингера // Вестн. Ленкоранского гос. ун-та. Сер. естеств. наук. Ленкорань, 2007. С. 3–56.
11. Искендеров А.Д., Ягубов Г.Я., Мусаева М.А. Идентификация квантовых потенциалов. Баку: Чашыюглу, 2012. 548 с.
12. Искендеров А.Д., Ягуб Г.Я., Салманов В.И., Акцой Н.Й. Задача оптимального управления для нелинейного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым и с комплексным потенциалом // Науч. тр. Нахичеванского гос. ун-та. Серия физ.-мат. и техн. наук. 2019. № 4 (101). С. 32–44.
13. Salmanov V. Existence and uniqueness of the solution to the problem optimal control problem with integral criterion qualities over the entire domain for a nonlinear Schrödinger equation with a special gradient // Control and cybernetics. Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences. Warszawa, Poland, 2020. Vol. 3. P. 211–290.
14. Искендеров А., Ягуб Г., Салманов В. Разрешимость начально-краевой задачи для нелинейного уравнения Шрёдингера со специальным градиентным слагаемым и с комплексным потенциалом // Науч. тр. Нахичеванского гос. ун-та. Серия физ.-мат. и техн. наук. 2018. № 4 (93). С. 28–43.

References

1. Butkovsky A.G., Samoylenko Yu.I. *Control of quantum mechanical processes*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 256 p. (In Russ.).
2. Vorontsov M.A., Schmalhausen V.I. *Principles of adaptive optics*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. 366 p. (In Russ.).
3. Zhuravlev V.M. *Nonlinear waves in multicomponent systems with dispersion and diffusion*. Ulyanovsk: Ulyanovsk State University Press; 2001. 200 p. (In Russ.).

4. Akbaba G.D. *The optimal control problem with the Lions functional for the Schrödinger equation including virtual coefficient gradient*. Master's thesis. Kars, 2011. 71 p. (In Turkish).
5. Yagubov G., Toyoğlu F., Subaşı M. An optimal control problem for two-dimensional Schrödinger equation. *Applied Mathematics and Computation*. 2012;218(11):6177-6187.
6. Iskenderov A.D., Yagubov G.Ya. Variational method for solving the inverse problem of determining the quantum mechanical potential. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1988;303(5):1044-1048. (In Russ.).
7. Iskenderov A.D., Yagubov G.Ya. Optimal control of nonlinear quantum mechanical systems. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*. 1989;(12):27-38. (In Russ.).
8. Yagubov G.Ya., Musaeva M.A. On one identification problem for the nonlinear Schrodinger equation. *Dif. uravneniya = Differential Equations*. 1997;33(12):1691-1698. (In Russ.).
9. Baudouin L., Kavian O., Puel J.P. Regularity for a Schrodinger equation with singular potentials and application to bilinear optimal control. *J. Differential Equations*. 2005;216:188-222.
10. Iskenderov A., Yagubov G. Optimal control of unlimited potential in a multidimensional nonlinear non-stationary Schrodinger equation. *Vestn. Lenkoranskogo gos. un-ta. Ser. estestvennykh nauk = Bulletin of the Lankaran State University. Natural Sciences*. 2007;3-56. (In Russ.).
11. Iskenderov A.D., Yagubov G.Ya., Musaeva M.A. *Identification of quantum potentials*. Baku: Chashyoglu Publ.; 2012. 548 p. (In Russ.).
12. Iskenderov A.D., Yagub G.Ya., Salmanov V.I., Aktsoy N.Y. Optimal control problem for a nonlinear Schrodinger equation with a special gradient term and with a complex potential. *Nauch. tr. Nakhichevanskogo gos. un-ta. Seriya fiz.-mat. i tekhnich. nauk = Scientific Works of Nakhichevan State University. A Series of Physical, Mathematical and Technical Sciences*. 2019;(4):32-44. (In Russ.).
13. Salmanov V. Existence and uniqueness of the solution to the problem optimal control problem with integral criterion qualities over the entire domain for a nonlinear Schrödinger equation with a special gradient. *Control and cybernetics*. Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences. Warszawa, Poland, 2020;3:211-290.
14. Iskenderov A., Yagub G., Salmanov V. Solvability of the initial boundary value problem for the nonlinear Schrodinger equation with a special gradient term and with a complex potential. *Nauch. tr. Nakhichevanskogo gos. un-ta. Seriya fiz.-mat. i tekhnich. Nauk = Scientific Works of Nakhichevan State University. A Series of Physical, Mathematical and Technical Sciences*. 2018;(4):28-43. (In Russ.).

Информация об авторе

В.И. Салманов – доктор философии по математике, доцент.

Information about the author

V.I. Salmanov - PhD in Mathematics, Associate Professor.

*Статья поступила в редакцию 09.08.2022; одобрена после рецензирования 12.12.2022; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 09.08.2022; approved after reviewing 12.12.2022; accepted for publication 19.05.2023.*

Научная статья

УДК 533.69

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-38-47

О ВЛИЯНИИ ВИНГЛЕТОВ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОГО КРЫЛА

Илья Константинович Самсонов¹, Межлум Альбертович Сумбатян²

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

¹ hazar7073@sfedu.ru

² masumbatyan@sfedu.ru

Аннотация. Рассматривается задача симметричного обтекания потоком воздуха тонкой пластинки с винглетами. Определяется степень влияния винглетов на подъёмную силу тонкой пластинки. Представлены данные, полученные с помощью математической модели, основанной на линеаризованной теории тонкого крыла и методе малых возмущений. В рамках этой теории задача сводится к системе двух двумерных интегральных уравнений, для решения которой применяется метод дискретных вихрей. Для сравнения также представлены данные, полученные в ходе натурального эксперимента с пластинками различных размеров с винглетами и без них. Проведено сравнение полученных результатов по аналитической теории с данными натурального эксперимента. Сделаны выводы о влиянии винглетов на подъёмную силу. Отмечается, что на малых углах атаки результаты экспериментов подтверждают теоретические выводы. Общий вывод состоит в том, что наличие винглетов рассмотренного вида увеличивает подъёмную силу крыла до 10 %, что приводит к экономии топлива при их использовании.

Ключевые слова: аэродинамика, подъёмная сила, тонкая пластинка, винглеты

Для цитирования: Самсонов И.К., Сумбатян М.А. О влиянии винглетов на аэродинамические свойства тонкого крыла // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 38–47.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-29-06013.

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

Original article

THE EFFECT OF WINGLETS ON THE AERODYNAMIC PROPERTIES OF A THIN WING

Ilya K. Samsonov¹, Mezhlum A. Sumbatyan²

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

¹ hazar7073@sfedu.ru

² masumbatyan@sfedu.ru

Abstract. The paper considers the problem of symmetrical airflow around a thin plate with winglets. There is studied the effect of the winglets on the lifting force of a thin plate. There are presented the data obtained by using a mathematical model, which is based on a linearized theory of thin wing and a method of small perturbations. In frames of this theory, the problem is reduced to a system of two dual integral equations, which is solved by a discrete vortex method. For comparison, we also present the data obtained in natural experiment with thin plates of various sizes with and without winglets. Then we perform a comparison between the analytical theory and the data of the natural experiments. Some conclusions are made about the effect of winglets on the lifting force. It is stressed that with small attack angles the experimental results confirm the theoretical conclusions. The general conclusion is that the winglets of the discussed type increase the lifting force up to 10 % that may lead to fuel economy with their usage.

© Самсонов И.К., Сумбатян М.А., 2023

Keywords: aerodynamics, lifting force, thin plate, winglets

For citation: Samsonov I.K., Sumbatyan M.A. The Effect of Winglets on the Aerodynamic Properties of a Thin Wing. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):38-47. (In Russ.).

Acknowledgments: the work was supported by RFBR, project No. 19-29-06013.

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

Введение

Одной из числа наиболее значимых характеристик летательного аппарата является подъёмная сила, на которую множество явлений и факторов влияют негативно: лобовое сопротивление, наличие вихрей вдоль крыла и на его концах, и ряд других [1–4]. Существует несколько способов увеличения подъёмной силы, в том числе и за счёт уменьшения влияния данных негативных факторов. Таким методом является уменьшение концевых вихрей. Как известно, локальная подъёмная сила в точках крыла уменьшается практически до нуля при приближении к его боковым кромкам, что, в частности, описывается теорией несущей линии Прандтля [5], а также более точными теориями крыла конечного размаха. Физически уменьшение подъёмной силы на концах крыла связано с перетеканием воздуха из-за более высокого давления с его нижней лицевой поверхности на верхнюю через боковые кромки. Математически это выражается в том, что основное интегральное уравнение теории тонкого крыла имеет гиперсингулярную особенность вдоль размаха крыла; при этом его ограниченное решение стремится к нулю на концах. Уменьшить эффект перетекания и улучшить лётные характеристики крыла можно с помощью винглетов (открылков), расположенных на боковых концах крыльев. Они теоретически должны препятствовать описанному перетеканию воздуха снизу вверх через боковую кромку.

Эффективность винглетов подробно исследована в [6–9]. Приложения в реальном авиастроении описаны в [10–13]. Некоторые актуальные экспериментальные и полуэмпирические исследования отражены в [14–18].

Заметим, что в перечисленных работах, где также имеется ряд других полезных литературных ссылок, как правило, применяются либо экспериментальные, либо прямые численные методы моделирования, в том числе с использованием современных вычислительных коммерческих пакетов. В то же время, как было отмечено выше, в теории тонкого крыла имеется несколько классических теорий. Одна из них – трёхмерная теория тонкого крыла, основанная на методе малых возмущений, в рамках которой удастся построить аналитическую теорию и свести задачу обтекания к некоторому двумерному интегральному уравнению. В монографиях [19, 20] основное интегральное уравнение теории тонкого крыла выводится на основе физических принципов вихревой динамики – метод, родственной подходу Прандтля, с заменой крыла системой неизвестных вихрей и дальнейшим поиском их интенсивности, удовлетворением граничному условию непроницаемости на твердой поверхности крыла. В российской литературе такой подход получил название «метод дискретных вихрей» (метод ДВ). В зарубежной литературе за ним закрепилось название «панельный метод» [21]. Вопросам численного обоснования метода ДВ посвящены монографии [22–25]. Также было показано, что классическое интегральное представление теории потенциала приводит к тому же базовому двумерному интегральному уравнению [26].

Если тонкое слабоизогнутое крыло расположено почти параллельно горизонтальной плоскости xu под малым углом атаки к однородному равномерному набегающему потоку, направленному параллельно оси x , то в рамках теории малых возмущений основное интегральное уравнение метода ДВ имеет вид

$$\iint_S \frac{g(\xi, \eta)}{(y - \eta)^2} \left[\frac{x - \xi}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} + 1 \right] d\xi d\eta = F(x, y), \quad (x, y, 0) \in S. \quad (1)$$

Здесь S – проекция поверхности крыла на горизонтальную плоскость xu ; переменные x и ξ изменяются вдоль хорды крыла (параллельно набегающему потоку), y и η – вдоль размаха крыла ортогонально к набегающему потоку. При этом функция $F(x, y)$ связана с формой поверхности крыла, а

функция $g(x,y)$ – с распределением локальной подъемной силы (локального аэродинамического давления) по поверхности крыла. В ядре уравнения (1) в явном виде присутствует квадратичная гиперсингулярная особенность в знаменателе в виде члена $(y - \eta)^2$. Это автоматически предопределяет то, что ограниченное решение единственно и стремится к нулю на боковых кромках крыла [27]. Интегрируя вдоль размаха и учитывая значение табличного интеграла

$$\int \frac{d\eta}{(y - \eta)^2 \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} = \frac{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}{(y - \eta)(x - \xi)^2}, \quad (2)$$

после сокращения на $(x - \xi)$ очевидно появление сингулярной особенности типа Коши первого порядка в виде члена $(x - \xi)$ в знаменателе. Таким образом, поведение ядра вдоль хорды принципиально отличается от его поведения вдоль размаха крыла. При этом решение вдоль хорды с ядром типа Коши не единственно. Для выделения единственного решения необходимо привлечь гипотезу Жуковского – Чаплыгина (Кутта – Жуковского – в зарубежной терминологии) об ограниченности решения на задней кромке крыла. В рамках этой гипотезы решение становится единственным, ограниченным на задней кромке и имеющим корневую особенность на передней кромке. Достоинство метода ДВ [22–24] состоит в том, что при численной реализации он автоматически обеспечивает выполнение гипотезы Жуковского – Чаплыгина.

Целью данной работы является распространение метода ДВ на случай тонкого крыла с двумя винглетами на его концах. При этом винглеты сами являются тонкими пластинками, расположенными вертикально, ортогонально к основному крылу.

Формулировка задачи и сведение к системе интегральных уравнений

Пусть равномерный при $x \rightarrow -\infty$ однородный поток идеальной несжимаемой жидкости обтекает крыло с двумя винглетами (рис. 1 и 2). Основное крыло представляет собой тонкую жесткую слабоизогнутую пластинку, поверхность которой определяется уравнением $z=f(x,y)$.

При этом скорость потока равна V_0 , а угол атаки $\alpha = -\partial f / \partial x$ может быть переменным как внутри каждой хорды, так и вдоль размаха. Таким образом, в общем случае основное крыло может быть закрученным. Два винглета на концах крыла являются тонкими вертикальными пластинками, жестко соединенными с основным крылом и установленными параллельно набегающему потоку. Схема обтекания показана на рис. 1, 2.

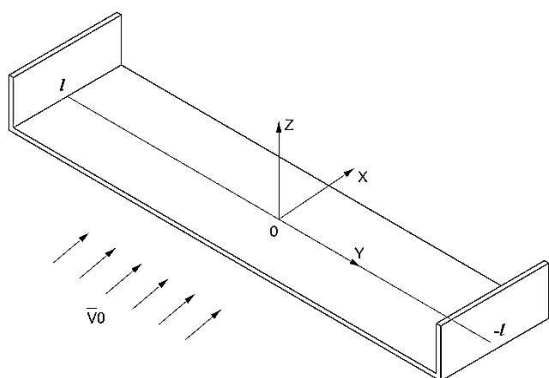


Рис. 1. Схема обтекания тонкой пластинки с винглетами / Fig. 1. Scheme of the flow past a thin plate with winglets

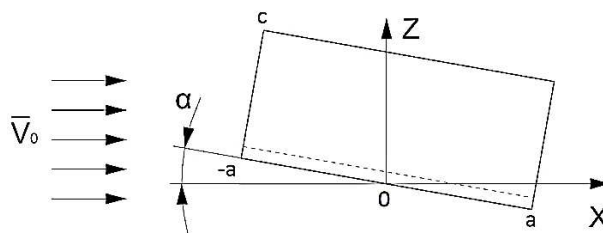


Рис. 2. Вид сбоку при обтекании тонкой пластинки с винглетами / Fig. 2. Side view of a flow around a thin plate with winglets

В работе авторов [28] показано, что в рамках теории малых возмущений для тонкого крыла в общем случае задача может быть сведена к системе трех двумерных интегральных уравнений относительно трех функций: $\gamma_w(x,y), \gamma_1(x,z), \gamma_2(x,z)$, связанных с распределением аэродинамического давления на основной пластинке и на двух винглетах. Более точно: функция $\gamma_w(x,y)$ равна разности давления на нижней и верхней сторонах основного крыла, $\gamma_1(x,z)$ – на

внешней и внутренней сторонах правого винглета при $y = -l$, функция находится аналогично для левого винглета (при $y = l$).

В данной работе ограничимся случаем симметричного обтекания относительно оси Ox . В этом случае $\gamma_2(x, z) = \gamma_1(x, z)$, и система 3×3 из [28] упрощается до системы 2×2 . Здесь мы приведем альтернативный вывод, приводящий даже к более простому виду, чем просто частный случай общей системы [28]. Заодно, как будет показано ниже, такой подход автоматически обеспечивает устойчивость вычислений после сведения интегральных операторов к дискретному виду.

Из работы [28, формула (3.4)] после устранения описки (лишний множитель 2 в линеаризованном интеграле Бернулли (2.2)) получаем представление для потенциала возмущенной скорости потока в произвольной точке (x, y, z) . При $\gamma_2(x, z) = \gamma_1(x, z)$ из этой формулы следует

$$4\pi V_0 \varphi' = \iint_{S_w} \frac{z \gamma_w(\xi, \eta)}{(y - \eta)^2 + z^2} \left(\frac{x - \xi}{q_w} + 1 \right) d\xi d\eta + \iint_{S_1} \gamma_1(\xi, \zeta) \left[\frac{l + y}{(l + y)^2 + (z - \zeta)^2} \left(\frac{x - \xi}{q_1} + 1 \right) + \frac{l - y}{(l - y)^2 + (z - \zeta)^2} \left(\frac{x - \xi}{q_2} + 1 \right) \right] d\xi d\zeta, \quad (3)$$

$$q_w = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2]^{1/2}, \quad q_1 = [(x - \xi)^2 + (l + y)^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2}, \\ q_2 = [(x - \xi)^2 + (l - y)^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2}.$$

Предполагается, что вдоль размаха длина крыла равна $2l$.

Для получения интегральных уравнений на основе формулы (3) необходимо сначала удовлетворить условию непроницаемости на основном крыле S_w : $\partial \varphi' / \partial z = V_0 \partial f / \partial x$ [28, условие 3.6], что при $z = 0$ приводит к уравнению

$$\iint_{S_w} \frac{\gamma_w(\xi, \eta)}{(y - \eta)^2} \left(\frac{x - \xi}{q_{ww}} + 1 \right) d\xi d\eta - \iint_{S_1} \gamma_1(\xi, \zeta) \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{l + y}{t_{w1}} \left(\frac{x - \xi}{q_{w1}} + 1 \right) + \frac{l - y}{t_{w2}} \left(\frac{x - \xi}{q_{w2}} + 1 \right) \right] d\xi d\zeta = 4\pi V_0^2 \frac{\partial f}{\partial x}, \quad (x, y, 0) \in S_w, \quad (4)$$

$$t_{w1} = (l + y)^2 + \zeta^2, \quad t_{w2} = (l - y)^2 + \zeta^2, \quad q_{ww} = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2}, \\ q_{w1} = [(x - \xi)^2 + (l + y)^2 + \zeta^2]^{1/2}, \quad q_{w2} = [(x - \xi)^2 + (l - y)^2 + \zeta^2]^{1/2}.$$

Здесь учтено, что для разностных ядер, зависящих по третьей переменной только от $(z - \zeta)$, имеет место очевидное соотношение $\partial / \partial z = -\partial / \partial \zeta$.

По аналогии для получения второго интегрального уравнения необходимо продифференцировать соотношение (3) по переменной y , чтобы удовлетворить условию непроницаемости на винглете S_1 : $\partial \varphi' / \partial y = 0$ [28, условие 3.5], что при $y = -l$ приводит к уравнению

$$-\iint_{S_w} \gamma_w(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{z}{t_{1w}} \left(\frac{x - \xi}{q_{1w}} + 1 \right) \right] d\xi d\eta + \iint_{S_1} \gamma_1(\xi, \zeta) \left\{ \left(\frac{x - \xi}{q_{11}} + 1 \right) + \frac{1}{t_{12}} \left[\left(\frac{8l^2}{t_{12}} - 1 \right) \left(\frac{x - \xi}{q_{12}} + 1 \right) + \frac{4l^2(x - \xi)}{q_{12}^3} \right] \right\} d\xi d\zeta = 0, \quad (x, -l, z) \in S_1, \quad (5)$$

$$t_{1w} = (l + \eta)^2 + z^2, \quad t_{12} = 4l^2 + (z - \zeta)^2, \quad q_{11} = [(x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2}, \\ q_{1w} = [(x - \xi)^2 + (l + \eta)^2 + z^2]^{1/2}, \quad q_{12} = [(x - \xi)^2 + 4l^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2}.$$

Вспомним, что в уравнениях (4), (5) интегралы по S_w применяются на крыле, а по S_1 – на винглете. Следовательно, функция γ_w определяет основную аэродинамическую характеристику – локальную подъемную силу на крыле. Полная подъемная сила равна интегралу от функции γ_w по основному крылу S_w .

Каждый из четырех интегральных операторов в системе (4), (5) имеет очевидный смысл. Так, первый интеграл в (4) определяет влияние давления в точке (ξ, η) основного крыла на значение

вертикальной компоненты скорости в точке (x, y) этого же крыла. Фактически этот интегральный оператор повторяет оператор (1) классической теории тонкой несущей поверхности. Второй интеграл в (4) определяет влияние давления в точках (ξ, η) винглетов на значение вертикальной компоненты скорости в точке (x, y) основного крыла. Этот интегральный оператор, в отличие от предыдущего, не имеет «подвижных» особенностей в своем ядре, т.е. особенностей при $(\xi - x) \rightarrow 0$. Однако он имеет «неподвижную» особенность на ребрах соединения винглетов с основным крылом. В самом деле, при одновременном выходе точек на основном крыле и на винглете к ребру, т.е. при $\zeta \rightarrow 0$ и $y \rightarrow -l$, член $(l + y)/t_{w1}$ в уравнении (4) имеет особенность. Аналогичная неподвижная особенность имеет место в уравнении (4) и при приближении ко второму ребру, при $\zeta \rightarrow 0$ и $y \rightarrow l$. Первый интеграл в (5) определяет влияние давления в точке (ξ, η) основного крыла на значение горизонтальной поперечной компоненты скорости в точке (x, z) винглета; его ядро также имеет неподвижную особенность при приближении к ребру. Наконец, второй интеграл в (4) определяет влияние давления в точках (ξ, ζ) винглетов на значение горизонтальной поперечной компоненты скорости в точке (x, z) винглета. Первая часть этого интегрального оператора соответствует взаимному влиянию точек внутри одного винглета и соответствует оператору (1) классической теории крыла, а вторая часть этого оператора определяет влияние одного винглета на другой и имеет регулярное ядро.

Дискретная форма уравнений

Дискретизация двумерных интегралов в полученной системе осуществляется в соответствии с методом ДВ [22–24]. Ограничимся случаем, когда основное крыло имеет прямоугольную форму в плане и оба винглета также являются прямоугольными. При этом вдоль размаха длина крыла равна $2l$, хорда крыла – $2a$, высота каждого винглета – c .

При дискретизации интеграл с регулярным ядром (третья строка в уравнении (5)) можно трактовать любым известным способом, основанным на квадратурных формулах для непрерывных функций. Особое внимание следует уделить первому интегралу в (4) и нерегулярной части второго интеграла в (5).

При интегрировании в поперечном направлении, ортогональном направлению потока (соответственно, по переменной η в (4) и по переменной ζ в (5)), метод ДВ фактически означает, что интегрирование вдоль каждого малого отрезка $(y_j - h_y/2, y_j + h_y/2)$ по переменной η (или вдоль $(z_k - h_z/2, z_k + h_z/2)$ по переменной ζ) при вычислении гиперсингулярного интеграла осуществляется так, как если бы подынтегральное выражение было непрерывным [22–24, 27]. При этом автоматически обеспечивается ограниченность решения; более того, оно автоматически стремится к нулю на концах интервала. Здесь h_y и h_z – шаги сетки по переменным y и z . При этом узлы сеток по внутренней переменной (переменная интегрирования) и по внешней переменной можно взять совпадающими: $\eta_j = y_j = -l + (j-1/2)h_y$, $(j=1, \dots, N_y)$, $h_y = 2l/N_y$, $\zeta_k = z_k = (k-1/2)h_z$, $(k=1, \dots, N_z)$, $h_z = c/N_z$. Значение первообразной при интегрировании по переменной η приведено в формуле (2). Аналогичный вид имеет первообразная при интегрировании гиперсингулярного ядра по переменной ζ . Более детально этот вопрос изложен в [26]. После этого поведение ядра по переменным ξ и x , т.е. вдоль хорды, становится сингулярным типа Коши.

Для корректной дискретизации вдоль хорды в рамках метода ДВ необходимо выбрать две разные системы узлов для внутренней и внешней переменных: $\xi_m = -a + mh_x$, $x_n = -a + (n-1/2)h_x$, $(m=1, \dots, N_x, n=1, \dots, N_x+1)$, $h_x = 2a/(N_x+1)$. Первая из них соответствует целым, а вторая – полужелым узлам внутри отрезка $(-a, a)$ при его разбиении на (N_x+1) малых интервалов. При этом корректная замена интеграла типа Коши конечной суммой внешне выглядит как квадратурная формула прямоугольников для непрерывных функций [22]:

$$\int_{-a}^a \frac{f(\xi)}{\xi - x_n} d\xi \approx h_x \sum_{m=1}^{N_x} \frac{f(\xi_m)}{\xi_m - x_n}. \quad (6)$$

Основная сложность при этом состоит в том, что внутренних узлов ξ_m здесь на единицу меньше, чем внешних x_n . При подстановке дискретного приближения (6) для сингулярных интегралов типа Коши в систему интегральных уравнений (4), (5) будет получаться система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), в которой число неизвестных меньше, чем число уравнений. Основным фундаментальным результатом метода ДВ [22] состоит в том, что для удовлетворения условию Кутта – Жуковского об ограниченности решения на задней кромке крыла необходимо из двух крайних внешних узлов x_1 и x_{N_x+1} оставить ближайший к кромке, которая при обтекании крыла является задней по отношению к набегающему потоку. При выборе системы координат, изображенной на рис. 1 и 2, очевидно, что задней кромкой является точка $x = a$. Следовательно, узел x_1 следует выбросить, а узел x_{N_x+1} нужно оставить. Таким образом, формулы типа (6) следует трактовать со следующим диапазоном изменения индекса n : $n = 2, \dots, N_x + 1$. В итоге число узлов по внутренним и внешним переменным становится одинаковым, равным N_x . Такова схема дискретизации для ядер, имеющих подвижные особенности, т.е. для первого интеграла в (4) и сингулярной части второго интеграла в (5).

В отличие от этого примененное выше специальное представление для ядер с неподвижной особенностью позволяет осуществить дискретизацию непосредственно. Например, во втором интеграле уравнения (4) при интегрировании по ζ вдоль малого элементарного интервала $(z_k - h_z/2, z_k + h_z/2)$ после вынесения неизвестной функции за знак интеграла интегрирование оставшегося ядра легко осуществляется в явном виде. Аналогичное интегрирование имеет место в первом интеграле уравнения (5) по переменной η . В итоге из системы интегральных уравнений (4), (5) после дискретизации получаем следующую СЛАУ:

$$h_x \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \frac{\gamma_w(\xi_m, y_j)}{y_i - \eta} \left(\frac{q_{n,m,i}^{ww}}{x_n - \xi_m} + 1 \right) \Bigg|_{\eta = y_j - \frac{h_y}{2}}^{y_j + \frac{h_y}{2}} - h_x \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_z} \gamma_1(\xi_m, z_k) \left[\frac{l + y_i}{t_i^{w1}} \left(\frac{x_n - \xi_m}{q_{n,m,i}^{w1}} + 1 \right) + \frac{l - y_i}{t_i^{w2}} \left(\frac{x_n - \xi_m}{q_{n,m,i}^{w2}} + 1 \right) \right] \Bigg|_{\zeta = z_k - \frac{h_z}{2}}^{z_k + \frac{h_z}{2}} = \quad (7)$$

$$= 4\pi\rho V_0^2 \frac{\partial f(x_n, y_i)}{\partial x}, \quad (n = 2, \dots, N_x + 1, \quad i = 1, \dots, N_y),$$

$$q_{n,m,i}^{ww} = [(x_n - \xi_m)^2 + (y_i - \eta)^2]^{1/2}, \quad t_i^{w1} = (l + y_i)^2 + \zeta^2, \quad q_{n,m,i}^{w1} = [(x_n - \xi_m)^2 + (l + y_i)^2 + \zeta^2]^{1/2},$$

$$t_i^{w2} = (l - y_i)^2 + \zeta^2, \quad q_{n,m,i}^{w2} = [(x_n - \xi_m)^2 + (l - y_i)^2 + \zeta^2]^{1/2},$$

$$- h_x \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \gamma_w(\xi_m, y_j) \frac{z_u}{t_u^{1w}} \left(\frac{x_n - \xi_m}{q_{n,m,u}^{1w}} + 1 \right) \Bigg|_{\eta = y_j - \frac{h_y}{2}}^{y_j + \frac{h_y}{2}} + h_x \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_z} \gamma_1(\xi_m, z_k) \left\{ \left(\frac{q_{n,m,u}^{11}}{x_n - \xi_m} + 1 \right) \Bigg|_{\zeta = z_k - \frac{h_z}{2}}^{z_k + \frac{h_z}{2}} + \frac{h_z}{12} \left[\left(\frac{8l^2}{t_{u,k}^{12}} - 1 \right) \left(\frac{x_n - \xi_m}{q_{n,m,u,k}^{12}} + 1 \right) + \frac{4l^2(x_n - \xi_m)}{(q_{n,m,u,k}^{12})^3} \right] \right\} = 0, \quad (n = 2, \dots, N_x + 1, \quad u = 1, \dots, N_z), \quad (8)$$

$$q_{n,m,u}^{11} = [(x_n - \xi_m)^2 + (z_u - \zeta)^2]^{1/2}, \quad t_u^{1w} = (l + \eta)^2 + z_u^2, \quad q_{n,m,u}^{1w} = [(x_n - \xi_m)^2 + (l + \eta)^2 + z_u^2]^{1/2},$$

$$t_{u,k}^{12} = 4l^2 + (z_u - z_k)^2, \quad q_{n,m,u,k}^{12} = [(x_n - \xi_m)^2 + 4l^2 + (z_u - z_k)^2]^{1/2}.$$

Полученная в результате описанной выше дискретизации СЛАУ (7), (8) решалась в среде С++ с применением стандартного итерационного метода Пейджа – Сондерса LSQR, эффективного для систем большой размерности [29].

Результаты расчетов и сравнение с экспериментальными данными

Для сравнения с теоретическими результатами были проведены натурные эксперименты по обдуву в аэродинамической трубе пластинок без винглетов и с винглетами. Образец без винглетов представляет собой дюралюминиевую пластинку толщиной 2 мм, габаритами 20×5 см в плане. При этом пластинка с винглетами имеет тот же размер в плане, с жестко прикрепленными по краям двумя вертикальными винглетами одинаковой высоты (1 см). Обдув осуществлялся в аэродинамической трубе замкнутого типа компании «Денар» (г. Ярославль) с рабочей частью 30×30 см в поперечнике и длиной 60 см. Скорость набегающего потока 11 м/с. Подъёмная сила P измерялась при помощи аэродинамических весов, скорость набегающего потока – трубок Пито – Прандтля. Угол атаки $\alpha = -\partial f / \partial x$ выбран постоянным как вдоль размаха, так и вдоль хорды в каждом сечении. Таким образом, пластинка выполнена незакрученной. В эксперименте угол атаки α изменялся от 2 до 14° с шагом 2°. Полученные данные выводились на компьютер через специализированное программное обеспечение. Сравнение расчетных результатов по предложенной здесь линейной теории малых возмущений и экспериментальными данными представлено в таблице, а в графическом виде – на рис. 3. Заметим, что при дискретизации выбиралось $N_y = 120$, $N_z = 15$, $N_x = 30$, так что полный размер дискретной сетки равен $(N_y + N_z)N_x = 4050$. При этом результаты практически не отличаются от сетки со значениями $N_y = 100$, $N_z = 10$, $N_x = 20$.

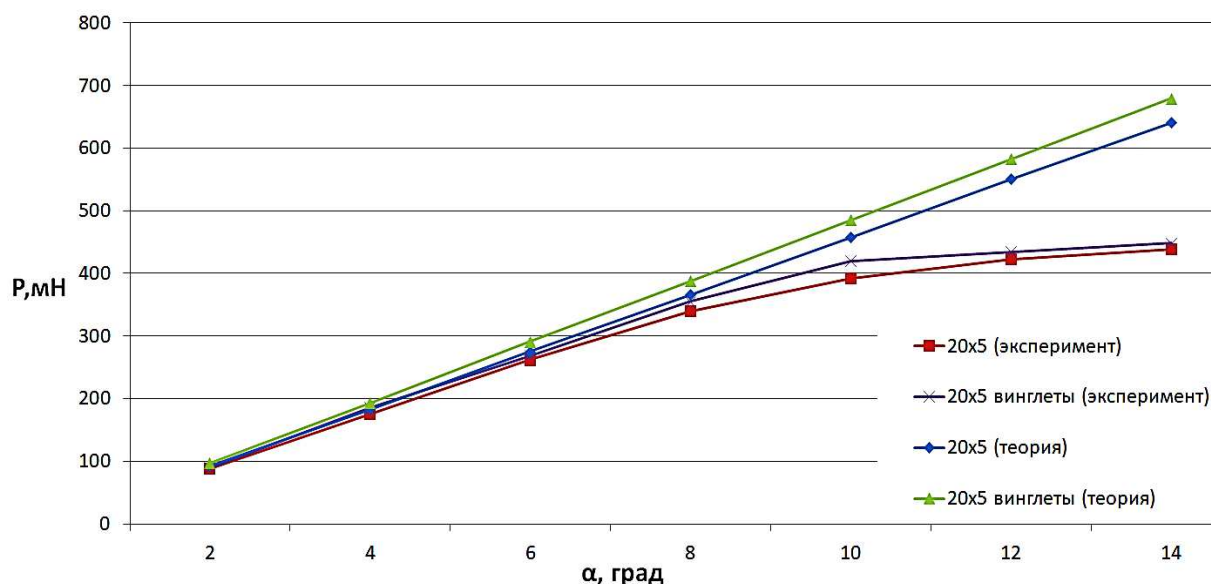


Рис. 3. Подъёмная сила пластинки 20×5 см без винглетов и с винглетами в зависимости от угла атаки / Fig. 3. The lifting force of the plate 20×5 cm without winglets and with winglets depending on the angle of attack

Экспериментальные данные по подъёмной силе P , мН, для пластинки размером 20×5 см и высотой винглета 1 см / Experimental data on the lifting force P , mN, for a plate 20×5 cm in size and a winglet height of 1 cm

$\alpha, ^\circ$	Эксперимент		Теория	
	Без винглетов	С винглетами	Без винглетов	С винглетами
2	88	90	92	97
4	175	185	183	193
6	262	269	275	291
8	340	355	366	388
10	392	419	458	485
12	423	434	550	582
14	439	448	641	679

Из приведенных данных видно, что пластинка с винглетами имеет выигрыш в подъёмной силе до 10 %, причем как в теории, так и в эксперименте.

Заключение

По результатам проведенного выше исследования можно сделать следующие выводы:

1. В данной работе классическая теория малых возмущений для тонкого слабоизогнутого крыла в идеальной жидкости обобщена на случай тонкого крыла с вертикальными винглетами при симметричном обтекании набегающим потоком. Сравнение линейной теории с результатами натуральных экспериментов показывает хорошую точность теоретических расчетов на малых углах атаки – примерно до 8° .

2. Обычно при плавном ламинарном обтекании хорошо обтекаемых профилей точность линейной теории в сравнении с экспериментом бывает высокой до больших углов – порядка $16-18^\circ$. В проведенных нами экспериментах существенное отклонение экспериментальных кривых от теоретических при $\alpha > 8^\circ$ объясняется нарушением условий плавного обтекания в аэродинамической трубе, которое связано с конечной толщиной пластинки (2 мм) в эксперименте; в теории толщина пластинки принимается нулевой.

3. Как отмечено выше, двумерные интегральные уравнения (4), (5) стандартного метода ДВ в случае винглетов, ортогональных к основному крылу, имеют неподвижную особенность на изломах, что затрудняет численный анализ. Дискретизация в окрестности изломов по той же схеме, что и в остальной области на крыле и на винглетах, приводит алгоритм ДВ к неустойчивости счета. Однако специальный подход авторов, с представлением ядра второго оператора в (4) и первого в (5) в виде производных от функций с более регулярным поведением, даёт устойчивый алгоритм.

4. Общий вывод состоит в том, что наличие винглетов рассмотренного вида действительно увеличивает подъемную силу крыла до 10 %, что приведет к экономии топлива при их использовании. При этом авторы ожидали здесь большего количественного выигрыша, чем было в действительности получено в расчетах и в эксперименте. Тем не менее при эксплуатации серийно выпускаемых гражданских самолетов считается, что если некоторый вид винглетов снижает потребление топлива не менее чем на 5 %, то их следует применять на практике.

Список источников

1. Jiang Y., Wang W., Qin Ch., Okolo P.N., Tang K. Investigation of the normal blowing approach to controlling wingtip vortex using LES // International J. of Aerospace Engineering. 2021. Article ID 6688569.
2. Samal S.K., Dash P.K. Reduction of wingtip vortex from suction at wingtip // Mechanical Engineering Research. 2013. Vol. 3, № 1. P. 152–162.
3. Xiang Y., Cheng Z.-P., Wu Y.-M., Liu H., Wang F. Scaling analysis on the dynamic and instability characteristics of isolated wingtip vortex // AIAA J. 2021. Vol. 59, № 12.
4. Gursul I., Wang Zh. Flow control of tip/edge vortices // AIAA J. 2018. Vol. 56, № 5.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. 4-е изд. М.: Наука, 1973. 848 с.
6. Parcher Sh., Pavek J., Jodeh N.M., Osteros R. Range performance flight test of small UAS with winglets // AIAA Aviation 2022 Forum, <https://doi.org/10.2514/6.2022-3213>.
7. Alkhafaji A.J., Panatov G.S., Boldyrev A.S. Numerical analysis and optimization of a winglet sweep angle and winglet tip chord for improvement of aircraft flight performance // Diagnostyka. 2022. Vol. 23, № 2. Article ID 2022210.
8. Devenport W.J., Rife M.C., Liapis S.I., Gollin G.J. The structure and development of a wing-tip vortex // J. of Fluid Mechanics. 1996. Vol. 312. P. 67–106.
9. Gehlert P., Sabnis K., Babinsky H. Effect of winglet serration geometry on the wingtip vortex // AIAA SCITECH. 2022. Forum, <https://doi.org/10.2514/6.2022-1961>.
10. Allen A., Breitsamter C. Transport aircraft wake influenced by a large winglet and winglet flaps // J. of Aircraft. 2008. Vol. 45, № 2. P. 686–699.
11. Ning A.S. Kroo I. Multidisciplinary considerations in the design of wings and wing tip devices // J. of Aircraft. 2010. Vol. 47, № 2. P. 534–543.
12. Takenaka K., Hatanaka K. Multidisciplinary design exploration for a winglet // J. of Aircraft. 2008. Vol. 45, № 5. P. 1601–1611.
13. Шевяков В.И. Способы совершенствования воздушных судов в целях сохранения конкурентоспособности на перспективу // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2015. № 212. С. 66–73.
14. Чичеров Н.А. Экспериментальные исследования распределения давления на крыле с концевыми шайбами при околосзвуковых скоростях // Уч. зап. ЦАГИ. 1986. № 3. С. 90–94.

15. Занин Б.Ю., Зверков И.Д. Влияние концевых шайб на топологию срывного течения на прямом крыле // *Аэромеханика и газовая динамика*. 2002. № 3. С. 1–5.
16. Москаленко В.О., Цой А.И., Недогарок А.А. Исследование аэродинамических характеристик крыла с законцовками различной формы // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2019. № 10. С. 1–12.
17. Галемин Е.К., Азеева Е.В. Метод учета влияния концевых шайб на обтекание крыла с изменяющимися по размаху профилями // *Изв. Юго-Западного гос. ун-та*. 2020. Т. 24, № 2. С. 49–59.
18. Пастухов А.И., Галемин Е.К., Денисов В.А. К расчету аэрогидродинамических характеристик крыльев с концевыми шайбами в несжимаемом потоке // *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение*. 2004. № 1. С. 20–31.
19. Белоцерковский С.М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа. М.: Наука, 1965. 243 с.
20. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978. 351 с.
21. Katz J., Plotkin A. *Low-speed Aerodynamics. From Wing Theory to Panel Methods*. N.Y.: McGraw-Hill, 1991. 632 p.
22. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М.: Наука, 1985. 254 с.
23. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент в математической физике, аэродинамике, теории упругости и дифракции волн. М.: Янус, 1995. 520 с.
24. Вайникко Г.М., Лифанов И.К., Полтавский Л.Н. Численные методы в гиперсингулярных уравнениях и их приложения. М.: Янус-К, 2001. 508 с.
25. Iovane G., Sumbatyan M.A., Lifanov I.K. On direct numerical treatment of hypersingular integral equations arising in mechanics and acoustics // *Acta Mechanica*. 2003. Vol. 162, № 1. P. 99–110.
26. Sumbatyan M.A., Bondarchuk A.A., Mescheryakov K.I. An efficient numerical algorithm in the classical 3D theory of thin lifting surface in a flow of non-viscous incompressible fluid // *Mechanics Research Communications*. 2018. Vol. 89. P. 18–22.
27. Сумбатян М.А., Скалия А. Основы теории дифракции с приложениями в механике и акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 327 с.
28. Sumbatyan M.A., Samsonov I.K. On the theory of thin lifting surface with winglets // *Mechanics Research Communications*. 2020. Vol. 109. Article ID 103519.
29. Paige C.C., Saunders M.A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares // *ACM Trans. Math. Software*. 1982. Vol. 8, № 1. P. 43–71.

References

1. Jiang Y., Wang W., Qin Ch., Okolo P.N., Tang K. Investigation of the normal blowing approach to controlling wingtip vortex using LES. *International J. of Aerospace Engineering*. 2021:6688569.
2. Samal S.K., Dash P.K. Reduction of wingtip vortex from suction at wingtip. *Mechanical Engineering Research*. 2013;3(1):152-162.
3. Xiang Y., Cheng Z.-P., Wu Y.-M., Liu H., Wang F. Scaling analysis on the dynamic and instability characteristics of isolated wingtip vortex. *AIAA J.* 2021;59(12).
4. Gursul I., Wang Zh. Flow control of tip/edge vortices. *AIAA J.* 2018;56(5).
5. Loitsyansky L.G. *Mechanics of liquid and gas*. 4th ed. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 848 p. (In Russ.).
6. Parcher Sh., Pavek J., Jodeh N.M., Osteros R. Range performance flight test of small UAS with winglets. *AIAA Aviation 2022 Forum*, <https://doi.org/10.2514/6.2022-3213>.
7. Alkhafaji A.J., Panatov G.S., Boldyrev A.S. Numerical analysis and optimization of a winglet sweep angle and winglet tip chord for improvement of aircraft flight performance. *Diagnostyka*. 2022;23(2):2022210.
8. Devenport W.J., Rife M.C., Liapis S.I., Gollin G.J. The structure and development of a wing-tip vortex. *Journal of Fluid Mechanics*. 1996;312:67-106.
9. Gehlert P., Sabnis K., Babinsky H. Effect of winglet serration geometry on the wingtip vortex. *AIAA SCITECH 2022 Forum*, <https://doi.org/10.2514/6.2022-1961>.
10. Allen A., Breitsamter C. Transport aircraft wake influenced by a large winglet and winglet flaps. *Journal of Aircraft*. 2008;45(2):686-699.
11. Ning A.S., Kroo I. Multidisciplinary considerations in the design of wings and wing tip devices. *Journal of Aircraft*. 2010;47(2):534-543.
12. Takenaka K., Hatanaka K. Multidisciplinary design exploration for a winglet. *Journal of Aircraft*. 2008;45(5):1601-1611.
13. Shevyakov V.I. Ways to improve aircraft in order to remain competitive in the future. *Nauch. vestn. MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*. 2015;(212):66-73. (In Russ.).
14. Chicherov N.A. Experimental distribution on a wing with end plates at transonic speeds. *Uch. zap. TsAGI = TsAGI Science Journal*. 1986;(3):90-94. (In Russ.).

15. Zanin B.Y., Zverkov I.D. Influence of end plates on the topology of the stall flow on a straight wing. *Aeromekhanika i gazovaya dinamika = Aeromechanics and Gas Dynamics*. 2002;(3):1-5. (In Russ.).
16. Moskalenko V.O., Tsoi A.I., Nedogorok A.A. The study of aerodynamic characteristics of a wing with tips of various shapes. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2019;(10):1-12. (In Russ.).
17. Galemin E.K., Agheeva E.V. A method for taking into account the influence of end plates on the flow around a wing with spanwise varying airfoils. *Izv. Yugo-Zapadnogo gos. un-ta = Proceedings of Southwest State University*. 2020;24(2):49-59. (In Russ.).
18. Pastukhov A.I., Galemin E.K., Denisov V.A. On calculation of aerohydrodynamic characteristics of wings with end washers in an incompressible flow. *Vestn. MGTU im. N.E. Baumana. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2004;(1):20-31. (In Russ.).
19. Belotserkovsky S.M. *Thin lifting surface in a transonic flow of gas*. Moscow: Nauka Publ.; 1965. 243 p. (In Russ.).
20. Belotserkovsky S.M., Nisht M.I. *Separated and non-separated flow around thin wings by the non-viscous fluids*. Moscow: Nauka Publ.; 1978. 351 p. (In Russ.).
21. Katz J., Plotkin A. *Low-speed Aerodynamics. From Wing Theory to Panel Methods*. New York: McGraw-Hill Publ.; 1991. 632 p.
22. Belotserkovsky S.M., Lifanov I.K. *Numerical methods in singular integral equations and their application in aerodynamics, elasticity theory, electrostatics*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. 254 p. (In Russ.).
23. Lifanov I.K. *Method of singular integral equations and numerical experiment in mathematical physics, aerodynamics, theory of elasticity and wave diffraction*. Moscow: Yanus Publ.; 1995. 520 p. (In Russ.).
24. Vainikko G.M., Lifanov I.K., Poltavsky L.N. *Numerical methods in hypersingular equations and their applications*. Moscow: Yanus-K Publ.; 2001. 508 p. (In Russ.).
25. Iovane G., Sumbatyan M.A., Lifanov I.K. On direct numerical treatment of hypersingular integral equations arising in mechanics and acoustics. *Acta Mechanica*. 2003;162(1):99-110.
26. Sumbatyan M.A., Bondarchuk A.A., Mescheryakov K.I. An efficient numerical algorithm in the classical 3D theory of thin lifting surface in a flow of non-viscous incompressible fluid. *Mechanics Research Communications*. 2018;89:18-22.
27. Sumbatyan M.A., Scalia A. *Fundamentals of diffraction theory with applications in mechanics and acoustics*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2013. 327 p. (In Russ.).
28. Sumbatyan M.A., Samsonov I.K. On the theory of thin lifting surface with winglets. *Mechanics Research Communications*. 2020;109:103519.
29. Paige C.C., Saunders M.A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Trans. Math. Software*. 1982;8(1):43-71.

Информация об авторах

И.К. Самсонов – аспирант, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

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

Information about the authors

I.K. Samsonov - Postgraduate Student, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences.

M.A. Sumbatyan - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

*Статья поступила в редакцию 13.02.2023; одобрена после рецензирования 28.02.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 13.02.2023; approved after reviewing 28.02.2023; accepted for publication 19.05.2023.*

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-48-54

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЖЕСТКОГО ШТАМПА И ПОРОУПРУГОЙ ПОЛОСЫ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ НА ПОРОУПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ

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

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

¹michebakov@yandex.ru[✉]

²ekolosova@sfedu.ru

Аннотация. Рассматривается плоская контактная задача о взаимодействии жесткого штампа с пороупругой полосой, лежащей на пороупругой полуплоскости. Деформация основания моделируется на основе уравнений теории пороупругих тел Ковина – Нунзиато. Предполагается, что основание штампа имеет плоскую форму, в зоне контакта отсутствует трение. С помощью интегрального преобразования Фурье поставленная задача сводится к сингулярному интегральному уравнению относительно неизвестного контактного напряжения. Для решения уравнения используется метод коллокаций. Найдены значения контактных напряжений и относительная деформация поверхности вне штампа. Проведен сравнительный анализ исследуемых величин для различных значений параметров пороупругой полосы и пороупругой полуплоскости. Численные результаты представлены в виде таблиц и графиков.

Ключевые слова: контактная задача, пористые материалы, пороупругость, модель Ковина – Нунзиато, плоская задача, порополоса, порополуплоскость, метод коллокаций, индентирование

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

Для цитирования: Чебаков М.И., Колосова Е.М. Взаимодействие жесткого штампа и пороупругой полосы, закрепленной на пороупругой полуплоскости // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 1. С. 48–54.

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

Original article

INTERACTION BETWEEN RIGID PUNCH AND POROELASTIC STRIP FIXED ON A POROELASTIC HALF-PLANE

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

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

¹michebakov@yandex.ru[✉]

²ekolosova@sfedu.ru

Abstract. A plane contact problem on the interaction of a rigid stamp with a poroelastic strip lying on a poroelastic half-plane is considered. The deformation of the base is modeled on the basis of the equations of the Covicin-Nunziato poroelastic bodies theory. It is assumed that the base of the stamp has a flat shape, there is no friction in the contact zone. Using the integral Fourier transform, the posed problem is reduced to a singular integral equation for an unknown contact stress, which is solved using the collocation method. The values of contact stresses and the relative deformation of the surface outside the stamp are found. A comparative analysis

© Чебаков М.И., Колосова Е.М., 2023

of the studied quantities for different values of the parameters of the poroelastic band and the poroelastic half-plane has been carried out. Numerical results are presented in the form of tables and graphs.

Keywords: contact problem, porous materials, poroelasticity, Cowin-Nunziato model, flat problem, poro-strip, poro-half-plane, collocation method, indentation

Acknowledgments: the study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state task in the field of scientific activity, scientific project No. FENW-2023-0012.

For citation: Chebakov M.I., Kolosova E.M. Interaction Between Rigid Punch and Poroelastic Strip Fixed on a Poroelastic Half-Plane. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):48-54. (In Russ.).

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

Введение

Пороупругие материалы обладают уникальными физическими, механическими, акустическими, электрическими и термическими свойствами. Данный тип материалов нашел широкое применение в различных сферах деятельности человека. Благодаря оптимальному соотношению массы и прочности он широко используется и в космической промышленности.

Важнейшим вопросом при производстве таких материалов является контроль и оценка их механических характеристик. Существуют различные подходы.

Один из подходов моделирования пористых материалов был развит в работах Ковина – Нунзиато [1]. Данная теория, называемая теорией микродилатации, была применена для исследования пористых тел с пустыми порами. Она использует линейную теорию упругости с дополнительной кинематической переменной, которая описывает свойства изменения пористости. Таким образом, деформация и пористость являются связанными полями, имеющими общую реакцию на внешние нагрузки, прикладываемые к телу.

Линейная теория описана в [2]. Ряд исследований проведен в последние годы. В работах [3, 4] решены контактные задачи в рамках плоской постановки для полуплоскости и полосы. В [5–10] рассмотрены осесимметричные и плоские контактные задачи для различных пороупругих оснований на основе уравнений теории Ковина – Нунзиато.

Постановка задач

Рассмотрим в декартовой системе координат (x, y) плоскую задачу о взаимодействии жесткого штампа с пороупругой полосой $0 \leq y \leq h$, закрепленной на пороупругой полуплоскости $y < 0$, деформация которых описывается соотношениями Ковина – Нунзиато [2–4]. Предполагается, что основание штампа имеет плоскую форму. Отметим, что в [3, 4] рассматривались контактные задачи для пороупругой полуплоскости и пороупругой полосы.

Деформации слоя $0 \leq y \leq h$ и полуплоскости $y < 0$, состоящих из однородных изотропных материалов с пустотами с различными параметрами, согласно теории Ковина – Нунзиато, описываются следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных [2–4]:

$$\mu_k \Delta u_k + (\lambda_k + \mu_k) \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_k}{\partial x \partial y} \right) + \beta_k \frac{\partial \Phi_k}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\mu_k \Delta w_k + (\lambda_k + \mu_k) \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w_k}{\partial y^2} \right) + \beta_k \frac{\partial \Phi_k}{\partial y} = 0, \quad \alpha_k \Delta \Phi_k - \xi_k \Phi_k - \beta_k \left(\frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial w_k}{\partial y} \right) = 0.$$

Здесь $k=1$ для полосы $0 \leq y \leq h$, $k=2$ для полуплоскости $y < 0$; μ_k и λ_k – коэффициенты Ламэ; α_k – коэффициент пустотной диффузии; β_k – параметр связи микродилатационных и макродилатационных свойств; ξ_k – пустотная жесткость; функция $\Phi_k(x, y)$ описывает изменение объемной части пор; u_k и w_k – перемещения вдоль осей x и y соответственно.

Компоненты тензора напряжений в полосе и полуплоскости определяются из соотношений

$$\sigma_x^k = \frac{\mu_k}{c_k^2} \left[\frac{\partial u_k}{\partial x} + (1 - 2c_k^2) \frac{\partial w_k}{\partial y} + H_k \Phi_k \right], \quad \sigma_y^k = \frac{\mu_k}{c_k^2} \left[(1 - 2c_k^2) \frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial w_k}{\partial y} + H_k \Phi_k \right], \quad \tau_{xy}^k = \mu_k \left(\frac{\partial u_k}{\partial y} + \frac{\partial w_k}{\partial x} \right).$$

Здесь использованы следующие обозначения [3, 4]: $c_k^2 = \frac{\mu_k}{\lambda_k + 2\mu_k} = \frac{1 - 2\nu_k}{2(1 - \nu_k)}$, $H_k = \frac{\beta_k}{\lambda_k + 2\mu_k}$,

где ν_k – коэффициенты Пуассона полосы $0 \leq y \leq h$ и полуплоскости $y < 0$.

Граничные условия при $y=h$ и $y=0$ запишутся в виде

$$\tau_{xy}^1 = 0, \quad \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad (y = h), \quad \sigma_y^1 = q(x) \quad (y = h, |x| \leq a) \quad \sigma_y^1 = 0 \quad (y = h, |x| > a),$$

$$\tau_{xy}^1 = \tau_{xy}^2, \quad \sigma_y^1 = \sigma_y^2, \quad w_1 = w_2, \quad u_1 = u_2, \quad \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} = 0 \quad (y = 0).$$

Здесь $q(x)$ – неизвестные контактные напряжения; $|x| \leq a$ – область контакта; $\int_{-a}^a q(x) dx = P$, P – сила, действующая на штамп, при этом штамп перемещается поступательно в отрицательном направлении оси y .

При $y \rightarrow -\infty$ напряжения и перемещения в полуплоскости затухают.

Построение интегрального уравнения

Используя представление неизвестных функций в уравнениях (1) в виде преобразования Фурье для пороупругих полосы ($k=1$) и полуплоскости ($k=2$), перемещения границы $y=h$ найдем по аналогии с [3, 4]

$$w(t) = l_{21}^{-1} w_1(t l_{21}) = \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b p(\tau) k(t - \tau) d\tau, \quad k(y) = \int_0^\infty L(u) \cos uy du, \quad (2)$$

где $w(t)$ – безразмерные перемещения границы $y=h$ под действием заданной силы; $b = a/l_{21}$ –

безразмерная величина; $p(\tau) = \frac{1 - \nu_1}{\mu_1} q(\tau l_{21})$ – безразмерные приведенные контактные напряже-

ния на границе $y=h$; функция $L(u)$, построенная с помощью аналитических преобразований, здесь не приводится, так как имеет довольно сложную и громоздкую структуру. При расчетах для разных значений параметров $L(u)$ находится численно с помощью программы Maple. Показано, что $\lim uL(u) = 1$ ($u \rightarrow \infty$); $\lim L(u) = \text{const}$ ($u \rightarrow 0$).

В дальнейшем $p(t)$, $|t| \leq b$ и $w(t)$ будем, соответственно, называть контактными напряжениями, областью контакта и перемещением поверхности $y=h$ полосы.

Рассмотрим внедрение без трения в поверхность $y=h$ жесткого штампа с плоским основанием. Тогда перемещение поверхности в зоне контакта $|x| \leq a$ примет вид $w_1(x) = -\delta$.

Предполагая, что под штампом контактные напряжения $q(x)$ неизвестны, получим для их нахождения, используя соотношения (2), интегральное уравнение с логарифмическим ядром

$$\int_{-b}^b p(\tau) k(t - \tau) d\tau = -\pi \delta^* \quad (|t| \leq b), \quad \text{где } \delta^* = \delta / l_{21}.$$

Для решения интегрального уравнения используем схему, предложенную в [3]. Для этого продифференцируем его. В результате получим интегральное уравнение с сингулярным ядром

$$\int_{-b}^b p(\tau) K(t - \tau) d\tau = 0 \quad (|t| \leq b), \quad (3)$$

$$K(y) = \frac{1}{y} + \int_0^\infty u M(u) \sin uy du, \quad M(u) = L(u) - 1/u. \quad (4)$$

Интеграл в (4) сходится, так как $\lim uM(u) = 0$ ($u \rightarrow \infty$), $\lim uM(u) = \text{const}$ ($u \rightarrow 0$).

Известно [11], что любая неуравновешенная нагрузка, приложенная к граничной линии $y = h$, приводит к бесконечному логарифмическому увеличению смещений. Однако мы можем вычислить относительное смещение поверхности $y = h$. Для этого исследуем величину [3]

$$w^*(t) = \pi[w(t) - w(0)] = \int_{-b}^b p(\tau) k^*(t, \tau) d\tau, \quad (5)$$

$$k^*(t, \tau) = 2 \int_0^\infty L(u) \sin \frac{u(t-2\tau)}{2} \sin \frac{ut}{2} du. \quad (6)$$

Интеграл (6) сходится с учетом поведения функции $L(u)$ в нуле и на бесконечности.

Решение интегрального уравнения

Для решения интегрального уравнения (3) применим прямой метод коллокаций [3, 4, 12]. Разобьем отрезок $[-b, b]$ на n отрезков $l_j = [-b + \varepsilon(j-1), -b + \varepsilon j]$, ($j = 1, \dots, n$), $\varepsilon = 2b/n$ и возьмем набор точек $\tau_j = -b + \varepsilon(j - 1/2)$ ($j = 1, 2, \dots, n$), $t_i = -b + \varepsilon i$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$).

Тогда (3) может быть сведено к решению системы [3, 4, 12].

$$\varepsilon \sum_{j=1}^n a_{ij} p_j = 0 \quad (i = 1..n-1) \quad (a_{ij} = K(t_i - \tau_j)) \quad , \quad (7)$$

$$\varepsilon \sum_{j=1}^n p_j = \tilde{P} \quad \left(\tilde{P} = \int_{-b}^b p(\tau) d\tau \right), \quad (8)$$

где $p_j = p(\tau_j)$, $\tilde{P} = P/l_{21}$ – приложенное к штампу приведенное значение силы (в дальнейшем слово «приведенное» опускаем).

Показано, что

$$a_{ij} = a_{1, j-i+1} \quad (2 \leq i \leq n-1, i \leq j \leq n), \quad a_{ij} = a_{1, i-j+2} \quad (2 \leq i \leq n-1, 1 \leq j \leq i-1). \quad (9)$$

Соотношения (9) позволяют значительно сократить объем вычислений. Достаточно вычислить элементы только первой строки матриц систем (7) и (8), а остальные элементы выражаются через них.

Через найденные значения p_j контактных напряжений может быть вычислена относительная деформация поверхности $y = h$. На основе (5) найдем $w^*(t) = \varepsilon \sum_{i=1}^n p_i k^*(t, \tau_i)$.

Числовые расчеты

На основе приведенной выше схемы решения интегрального уравнения были проведены расчеты контактных напряжений под штампом и относительной деформации поверхности $y = h$. В расчетах основное внимание уделялось влиянию параметров N_k , μ и толщины упругого слоя

$d = h/l_{21}$ на исследуемые величины, где $N_k = \frac{l_{2k}^2}{l_{1k}^2} H_k = \frac{\beta_k^2}{\xi_k(\lambda_k + 2\mu_k)}$ – безразмерная величина, ха-

рактеризующая пористость полуплоскости; $l_{1k}^2 = \frac{\alpha_k}{\beta_k}$, $l_{2k}^2 = \frac{\alpha_k}{\xi_k}$ (l_{1k} , l_{2k} измеряются в метрах). В

[3] показано, что $0 \leq N_k < 1 - c_k^2$. Отметим, что чем больше N_k , тем больше пористость материалов слоя и полуплоскости.

Для контроля точности предложенной схемы решения задачи рассмотрим частный случай, когда $N_k = 0$, $b = 1$, $\mu = \mu_2 / \mu_1 = 1$. Получим задачу о взаимодействии штампа с упругой полуплоскостью $y \leq h$, которая имеет точное решение [13]. Точные формулы из [13] для приведенных контактных напряжений $p(t)$ примут вид

$$p(t) = \frac{\tilde{P}}{\pi\sqrt{b^2 - t^2}}. \tag{10}$$

Для такой задачи контактные напряжения были рассчитаны по схеме (7), (8) и по формуле (10) при $\tilde{P}=1$. В табл. 1 приведены результаты расчетов по схеме (7), (8) при $n=100$ (второй столбец), $n=500$ (третий столбец) и по формуле (10) (четвертый столбец). В первом столбце таблицы указаны координаты точек под штампом.

Как видно из табл. 1, при $n=500$ результаты практически совпадают с точным решением во внутренней области контакта, наибольшая погрешность наблюдается в окрестности края штампа.

Таблица 1 / Table 1

Результаты расчётов контактных напряжений / Results of contact stress calculation

t	Схема (7), (8)		Формула (10)
	$n=100$	$n=500$	
0,01	0,320	0,319	0,318
0,31	0,337	0,335	0,335
0,51	0,373	0,371	0,370
0,61	0,405	0,402	0,402
0,81	0,551	0,544	0,543
0,91	0,790	0,772	0,768
0,95	1,073	1,030	1,019
0,99	2,832	2,372	2,256

В табл. 2 приведены контактные напряжения $p(t)$, а на рисунке – относительные деформации $w^*(t)$ поверхности $y = h$ при некоторых значениях параметров N_1, N_2, d , при постоянных значениях других параметров. Расчеты производились при $n=100$; $\nu_i = 0,3$; $\mu = 1$; $l_{ij} = 1$, при различных сочетаниях значений параметров $d=0,1; 0,5; 1; 2$; $N_1=0,1; 0,6$; $N_2=0,1; 0,6$.

На каждом из рисунков (а–г) графики пронумерованы в следующем порядке: 1-й соответствует параметрам $N_1=N_2=0,6$; 2-й – $N_1=0,6, N_2=0,1$; 3-й – $N_1=0,1, N_2=0,6$; 4-й – $N_1=N_2=0,1$.

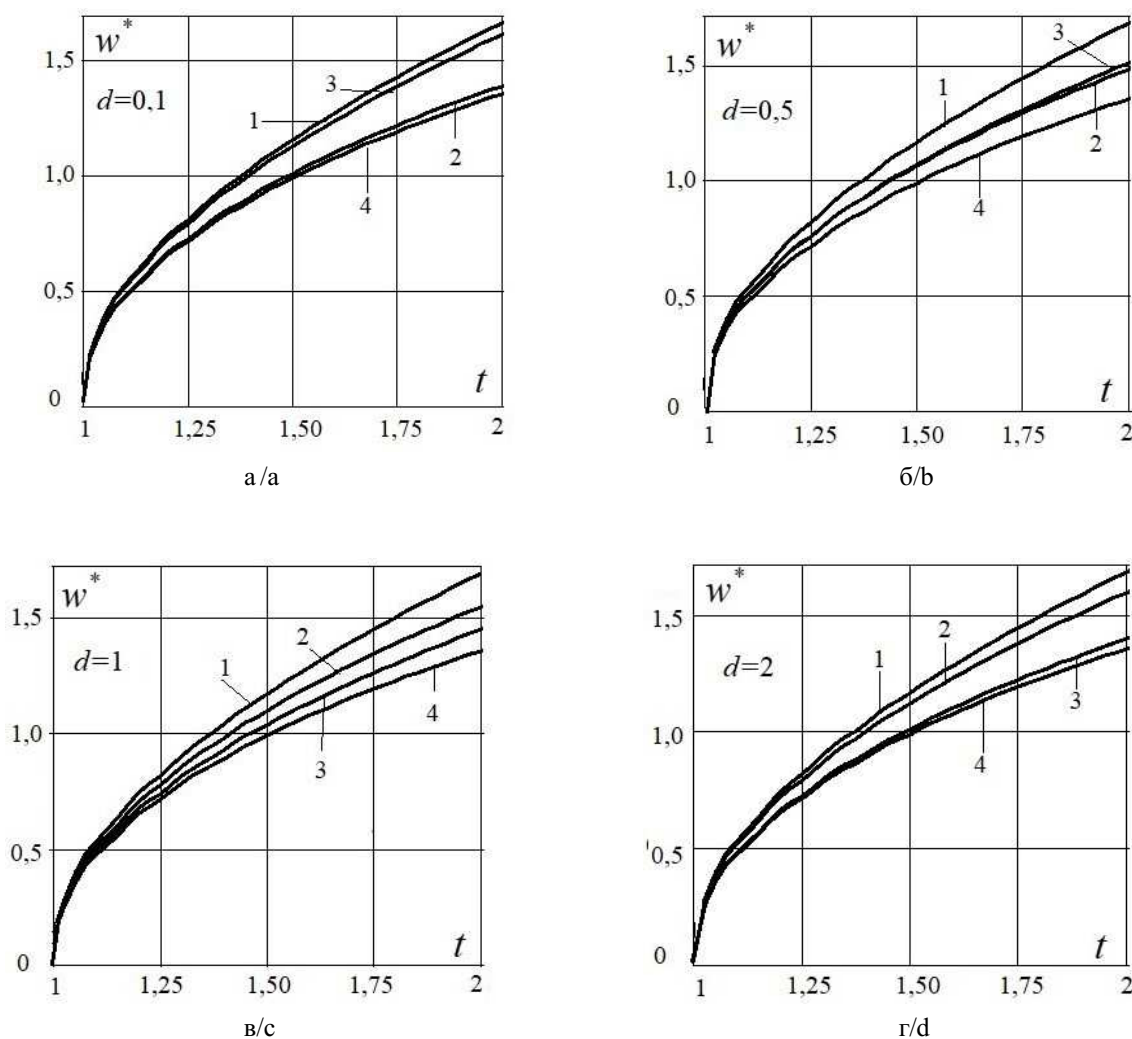
Таблица 2 / Table 2

Значения контактных напряжений под штампом / Values of contact stresses under the stamp

d	0,1		0,5		1		2		Произвольно	
N_1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,1	0,6
N_2	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6
$p(0,1)$	0,318	0,294	0,307	0,305	0,300	0,311	0,295	0,316	0,320	0,287
$p(0,3)$	0,332	0,312	0,323	0,321	0,317	0,327	0,313	0,331	0,335	0,306
$p(0,5)$	0,369	0,356	0,362	0,362	0,359	0,366	0,356	0,368	0,371	0,351
$p(0,7)$	0,454	0,454	0,454	0,455	0,454	0,455	0,454	0,454	0,454	0,454
$p(0,9)$	0,779	0,816	0,796	0,799	0,806	0,788	0,814	0,780	0,774	0,827

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, показывают, что контактные напряжения при $t=0,7$ имеют примерно одинаковые значения. В связи с этим отметим, что, если при одинаковых значениях d при $N_1=0,6; N_2=0,1$ контактные напряжения в середине штампа больше, чем при $N_1=0,1; N_2=0,6$, то при этих же значениях N_1, N_2 на краю штампа они меньше. Эта ситуация наблюдается при $d=0,1$ и $d=0,5$. При $d=1$ и $d=2$ картина обратная, т.е. если при $N_1=0,6; N_2=0,1$ контактные напряжения в середине штампа меньше, чем при $N_1=0,1; N_2=0,6$, то при этих же значениях N_1, N_2 на краю штампа они больше. Это указывает на то, что соответствующие графики контактных напряжений пересекаются примерно при $t=0,7$.

Графики на рисунке показывают, при каких значениях параметров N_1, N_2 пороупругое основание более податливо. Заметим, что чем выше кривая, тем более податливо основание при соответствующих параметрах.



Перемещение поверхности $y=h$: а – $d=0,1$; б – $d=0,5$; в – $d=1$; г – $d=2$ /
 Displacement of the surface $y=h$: а - $d=0,1$; б - $d=0,5$; в - $d=1$; д - $d=2$

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nunziato G.W., Cowin S.C. A nonlinear theory of elastic materials with voids // Arch. Ration Mech. Anal. 1979. Vol. 72. P. 175–201.
2. Cowin S.C., Nunziato G.W. Linear theory of elastic materials with voids // J. Elasticity. 1983. Vol. 13. P. 125–147.
3. Scalia A., Sumbatyan M.A. Contact problem for porous elastic half-plane // J. Elasticity. 2000. Vol. 60. P. 91–102.
4. Scalia A. Contact problem for porous elastic strip // Int. J. Eng. Sci. 2002. Vol. 40. P. 401–410.
5. Chebakov M.I., Poddubny A.A., Kolosova E.M., Alexiev A.R., Iankov R.Z. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic layer // Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences (Доклади на Болгарската академия науките). 2020. Vol. 73, № 6. P. 846–855.
6. Kolosova E.M., Chebakov M.I. Analytical Solution of Axisymmetric Contact Problem for a Poroelastic Layer // Mechanics of Solids. 2020. Vol. 55, № 6. P. 857–864.
7. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of axisymmetric stamp and elastic layer fixed on poroelastic base // Mechanics of Composite Materials. 2020. Vol. 56, № 6. P. 769–778.
8. Chebakov M.I., Poddubny A.A., Kolosova E.M., Alexiev A., Datcheva M. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic foundation // Materials Physics and Mechanics. 2020. Vol. 44, № 3. P. 423–432.
9. Chebakov M., Kolosova E., Iankov R., Datcheva M. Contact Problem for a Rigid Flat Stamp and a Linear Elastic Strip Bonded to Poroelastic Half-Plane // J. of Theoretical and Applied Mechanics. 2021. Vol. 51, iss. 3. P. 391–404.

10. Chebakov M. I., Kolosova E. M. Contact Interaction of an Axisymmetric Punch and a Poroelastic Layer Fixed on an Elastic Base // *Mechanics of Solids*. 2022. Vol. 57, № 3. P. 508–514.

11. Muskhelishvili N. I. *Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity*. Groningen, Holland: P. Noordhoff, 1953. 704 p.

12. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М.: Наука, Главная редакция физ.-матем. лит.-ры, 1985. 256 с.

13. Александров В.М., Чебаков М.И. Введение в механику контактных взаимодействий. Ростов н/Д.: ЦВВР, 2007. 114 с.

References

1. Nunziato G.W., Cowin S.C. A nonlinear theory of elastic materials with voids. *Arch. Ration Mech. Anal.* 1979;72:175-201.

2. Cowin S.C., Nunziato G.W. Linear theory of elastic materials with voids. *J. Elasticity*. 1983;13:125-147.

3. Scalia A., Sumbatyan M.A. Contact problem for porous elastic half-plane. *J. Elasticity*. 2000;60:91-102.

4. Scalia A. Contact problem for porous elastic strip. *Int. J. Eng. Sci.* 2002;40:401-410.

5. Chebakov M.I., Poddubny A.A., Kolosova E.M., Alexiev A.R., Iankov R.Z. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic layer. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. 2020;73(6):846-855.

6. Kolosova E.M., Chebakov M.I. Analytical Solution of Axisymmetric Contact Problem for a Poroelastic Layer. *Mechanics of Solids*. 2020;55(6):857-864.

7. Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact interaction of axisymmetric stamp and elastic layer fixed on poroelastic base. *Mechanics of Composite Materials*. 2020;56(6):769-778.

8. Chebakov M.I., Poddubnyy A.A., Kolosova E.M., Alexiev A., Datcheva M. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic foundation. *Materials Physics and Mechanics*. 2020;44(3):423-432.

9. Chebakov M., Kolosova E., Iankov R., Datcheva M. Contact Problem for a Rigid Flat Stamp and a Linear Elastic Strip Bonded to Porous Half-Plane. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2021;51(3):391-404.

10. Chebakov M. I., Kolosova E. M. Contact Interaction of an Axisymmetric Punch and a Poroelastic Layer Fixed on an Elastic Base. *Mechanics of Solids*. 2022;57(3):508-514.

11. Muskhelishvili N. I. *Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity*. Groningen, Holland: P. Noordhoff Publ.; 1953. 704 p.

12. Belotserkovskii S.M., Lifanov I.K. *Numerical methods in singular integral equations and their application in aerodynamics, elasticity theory, electrodynamics*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. 256 p. (In Russ.).

13. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Introduction to the mechanics of contact interactions*. Rostov-na-Donu: TsVVR Publ.; 2007. 114 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

M.I. Chebakov - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laboratory of Mechanics of Deformable Bodies and Structures, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

E.M. Kolosova - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Laboratory of Mechanics of Deformable Bodies and Structures, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; одобрена после рецензирования 14.04.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 30.03.2023; approved after reviewing 14.04.2023; accepted for publication 19.05.2023.

Научная статья

УДК 536.246

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-55-63

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОКАПЛИ. РАНЖИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ КАПЛИ

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

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

¹latiner@mail.ru[✉]

²kalaidin@econ.kubsu.ru

Аннотация. Выведено условие равновесия висящей осесимметрической капли для модели Дерягина, учитывающее толщину расклинивающего/молекулярного слоя поверхности капли. Для осесимметрической капли, образующая линия которой зависит от натурального параметра, найдено дифференциальное уравнение, решением которого является подынтегральная функция функционала расклинивающей энергии. Получено решение этого дифференциального уравнения. Построен функционал расклинивающей энергии капли. Уточнен функционал полной энергии осесимметричной висящей капли, учитывающий составляющую энергии межмолекулярного взаимодействия второго порядка малости. Из равенства нулю функционала полной энергии капли в точке примыкания капли к твердой горизонтальной поверхности в модели получена более точная форма зависимости контактного угла жидкость – твердое тело от радиуса пятна прилипания капли к горизонтальной твердой поверхности и высоты капли. Построено разложение потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия по степеням отношения межмолекулярного диапазона к типичному размеру для модели Дерягина, учитывающей толщину расклинивающего/молекулярного слоя поверхности капли, в силу чего в разложении по степеням потенциальной ямы появился элемент второго порядка малости. Проведено сравнение с другими моделями, определяющими угол смачивания в зависимости от высоты капли.

Ключевые слова: функционал полной энергии капли, расклинивающая энергия, модель Дерягина, функционал Уиллмора, условие равновесия капли, угол смачивания капли, нанокля, ранжирование полной энергии капли

Для цитирования: Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н. Геометрические характеристики нанокля. Ранжирование энергии капли // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 55–63.

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

Original article

GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF A NANODROP. RANKING OF DROP ENERGY

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

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

¹latiner@mail.ru[✉]

²kalaidin@econ.kubsu.ru

Abstract. The equilibrium condition of a hanging axially symmetric droplet is derived for the Deryagin model, which takes into account the thickness of the wedging/molecular layer of the droplet surface. For an axisymmetric drop, the forming line of which depends on a natural parameter, a differential equation is found, the solution of

© Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н., 2023

which is the integrand function of the functional of the wedging energy. The solution of this differential equation is found. The functional of the wedging energy of the drop is constructed. The functional of the total energy of an axisymmetric hanging drop is refined, taking into account the second-order component of the smallness of the energy of intermolecular interaction.

As a result of solving the variational problem, the equilibrium condition of a liquid droplet is obtained for the Deryagin model, which takes into account the thickness of the surface layer of the droplet. Due to the fact that the first variation of the functional of the total energy of a drop for an equilibrium drop is zero, a more accurate form of the dependence of the liquid-solid contact angle on the radius and height of the drop is obtained. The decomposition of the potential energy of the intermolecular interaction by degrees of the potential well is obtained for the Deryagin model, which takes into account the thickness of the wedging/molecular layer of the droplet surface, which is why a second-order element of smallness appeared in the decomposition by degrees of the potential well. A comparison with other models specifying the relationship of the wetting angle depending on the height of the drop is carried out.

Keywords: drop total energy functional, wedging energy, Deryagin model, Willmore functional, drop equilibrium condition, drop wetting angle, nanodrop, drop total energy ranking

For citation: Shcherbakov M.E., Kalaydin E.N. Geometric Characteristics of a Nanodrop. Ranking of Drop Energy. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):55-63. (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

Макроскопическая теория, описывающая действие поверхностных сил, основана на том, что эти силы действуют одинаково во всех направлениях на поверхности, которая ведет себя как эластичная мембрана с одинаковым напряжением во всех направлениях.

Это напряжение проявляется как сила, действующая перпендикулярно к любой кривой на поверхности в направлении центра окружности, локально описывающей её поведение. Потенциальная энергия эластичной мембраны необходима для изменения элемента площади под действием этих сил.

Из работ [1, 2] известно, что макроскопическую теорию можно получить из молекулярной, дающей выражение для коэффициента поверхностного натяжения (к.п.н.) через межмолекулярные потенциалы.

На макро- и микрокапли наибольшее влияние оказывают гравитация и сила поверхностного натяжения. Чем меньше размер капли, тем большее воздействие оказывают другие силы, влияние которых на каплю исследовалось в условиях невесомости [3, 4].

В работе [5] на основании молекулярной теории показано, что поверхность жидкости ведет себя механически как упругая пластина с постоянной изгибной жесткостью.

Эластичность проявляется в противодействии изгибанию промежуточного слоя. При этом энергия на единицу площади поверхности пропорциональна $H^2 - \frac{K}{3}$ (H, K – средняя и гауссова кривизна), что приводит к дополнительным членам в уравнении равновесия поверхности.

В работе [5] общая потенциальная энергия ранжирована по степеням $\epsilon_{\text{пот.я.}}$ (объемная энергия капли при $\epsilon_{\text{пот.я.}}$ в нулевой степени, энергия поверхностного натяжения при $\epsilon_{\text{пот.я.}}$ в первой степени, эластичная энергия поверхностного слоя при $\epsilon_{\text{пот.я.}}$ в третьей степени), что дает понимание вклада каждой энергии в общую потенциальную энергию капли.

Через $\epsilon_{\text{пот.я.}}$ авторы [5] обозначили отношение ширины потенциальной ямы к l , где l – типичный размер.

В [5] для модели висящей жидкой капли в воздухе/газе, где между жидкостью и газом отсутствует промежуточный слой, составлен функционал E энергии капли путем интегрирования всех потенциалов пар молекул жидкости, пар молекул газа, потенциалов между молекулами жидкости и молекулами газа $E = \sum_{i=1}^2 V_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^2 V_{ij}$, где потенциальная энергия взаимодействия молекул жидкости и газа – $V_{ij} = V_{ji}$; пар молекул жидкости – V_{ii} ; пар молекул газа, находящихся

на расстоянии меньше ширины потенциальной ямы от поверхности капли, – V_{jj} ; пар молекул жидкости и пар молекул газа, находящихся от поверхности Гиббса на расстоянии больше ширины потенциальной ямы, – V_1, V_2 .

$$V_1 = \int_{D_1} \rho_1^0 U_1(x) dx, \quad V_2 = \int_{D_2} \rho_2^0 U_2(x) dx,$$

$$V_{ij} = \varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-3} \int_{D_1} \int_{D_2} \rho_i^0 \rho_j^0 g_{ij}(|x - y| \varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-1}) \varphi_{ij}(|x - y| \varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-1}) dx dy,$$

где $U_i(x)$ – потенциальная энергия молекул вещества i ; $\rho_{ij}^{(2)}(x, y) = \rho_i^0 \rho_j^0 g_{ij}(|x - y| \varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-1})$ – количество пар между веществами i и j , находящихся от поверхности капли на расстоянии меньше ширины потенциальной ямы; $g_{ii}(|x - y| \varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-1})$ – радиальная функция распределения; ρ_i^0 – молекулярная плотность вещества в области D_i , $i = 1, 2$; $\varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-3} \varphi_{ij}(|x - y| \varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-1})$ – межмолекулярный потенциал.

Функции $g_{ij}(|x - y| \varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-1})$, $\varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-3} \varphi_{ij}(|x - y| \varepsilon_{\text{пот.я.}}^{-1})$ определены на отрезке $[0, 1]$, вычисляются для точек x, y , находящихся на расстоянии не больше ширины потенциальной ямы.

$$E = \int_{D_1} \rho_1^0 U_1(x) dx + \int_{D_2} \rho_2^0 U_2(y) dy + 2\pi(v_1 \phi_{11}^0 + v_2 \phi_{22}^0) -$$

$$- \varepsilon_{\text{пот.я.}} \pi \gamma_{12}^1 \int_{S_{12}} dA + \varepsilon_{\text{пот.я.}}^3 \frac{\pi}{16} \gamma_{12}^3 \int_{S_{12}} \left(H^2 - \frac{K}{3} \right) dA + \bar{O}(\varepsilon^4),$$

где $\gamma_{12}^k = \phi_{11}^k + \phi_{22}^k - 2\phi_{12}^k$; $\phi_{12}^k = \rho_1^0 \rho_2^0 \int_0^\infty r^{2+k} \varphi_{12}(r) g_{12}(r) dr$ – k -й момент $\rho_1^0 \rho_2^0 \varphi_{12}(r) g_{12}(r)$; D_i – область, занимаемая веществом i ; S_{12} – поверхность Гиббса, ограничивающая каплю.

Предполагается, что $\varphi_{12}(r), g_{12}(r)$ стремятся к нулю при $r \rightarrow \infty$, практически равны нулю вне $[0, 1]$, в силу чего k -е моменты существуют.

$\sigma_{LG} = \sigma_{12} = \pi/2 \varepsilon_{\text{пот.я.}} \gamma_{12}^1$ – коэффициент поверхностного натяжения на поверхности капли, висящей в воздухе/газе; $D_{12} = \pi/32 \varepsilon_{\text{пот.я.}}^3 \gamma_{12}^3$ – жесткость при изгибе поверхностного слоя.

Поверхность раздела не только ведет себя как мембрана по отношению к растяжению, но и как тонкая упругая пластина по отношению к изгибу.

Приравнявая первую вариацию функционала полной энергии к нулю, в [5] получили для модели, учитывающей упругие свойства поверхности капли, условие равновесия капли, уточняющее работу Р. Финна [6], а также формулу разности давлений $P_1 - P_2$ для точек на поверхности вращения $(x(s), y(s))$ висящей капли на основании следующих соотношений:

$$\varepsilon_{\text{пот.я.}} \pi \gamma_{12}^1 H + \varepsilon_{\text{пот.я.}}^3 \frac{\pi}{16} \gamma_{12}^3 [\Delta_s(H) + 2H^3 - 2HK] + \bar{O}(\varepsilon^4) = g\rho x(s) + \lambda, \quad (1)$$

$$P_1 - P_2 = g\rho x(s) + \lambda,$$

где $\Delta_s(H) = \ddot{H} + (\dot{y}/y)\dot{H}$ – лапласиан; \dot{H}, \dot{y} – производные по натуральному параметру; λ – множитель Лагранжа; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность капли; s – натуральный параметр; $x(s), y(s)$ – координаты точки на поверхности по вертикали и по горизонтали.

В своей модели авторы [5] не учитывают наличие переходного слоя от жидкости к газу и, следовательно, энергию по его формированию. В функционале полной энергии капли отсутствует составляющая, ей соответствующая.

В [7–9] предложена модель (рис. 1), в которой поверхностный слой состоит из трех частей: капиллярной, молекулярной/расклинивающей, переходной.

Для того чтобы переход от фазы жидкого состояния к газообразному был непрерывным, необходимо учесть влияние расклинивающего слоя ненулевой толщины между двумя разными фазами. Предполагается, что в поверхностном слое происходит перемешивание молекул различных субстанций (рис. 2). В этом случае необходимо учитывать потенциальную энергию взаимодействий молекул промежуточного слоя, молекул тела капли с молекулами промежуточного слоя и молекул газа, окружающих каплю, с молекулами промежуточного слоя. В результате в разложении полной энергии капли должен появиться новый элемент, соответствующий энергии, необходимой для формирования промежуточного слоя.

Используя понятие энергии эластичной мембраны и энергии для формирования этой эластичной мембраны/промежуточного слоя, можно вывести условие равновесия капли.

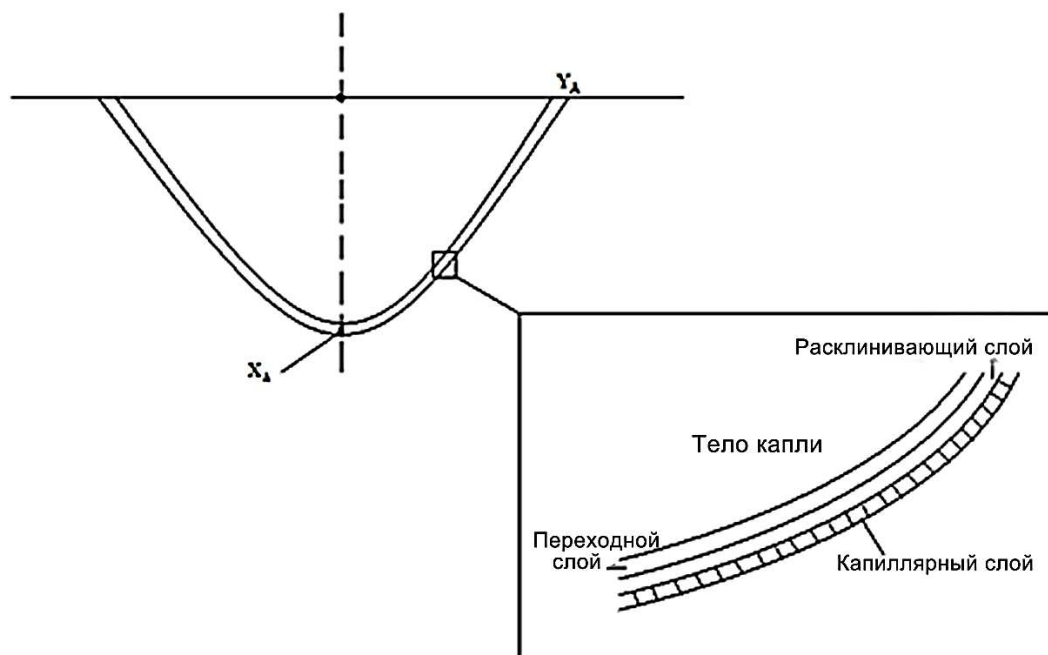


Рис. 1. Структура поверхностного слоя, предложенная Б.В. Дерягиным
/ Fig. 1. The structure of the surface layer proposed by B.V. Deryagin

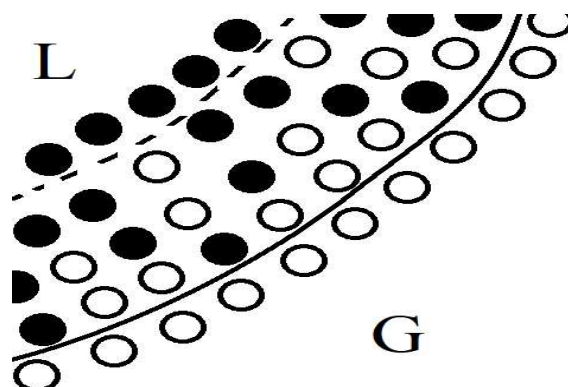


Рис. 2. Модель перемешивания различных субстанций в поверхностном слое
/ Fig. 2. Model of mixing of various substances in the surface layer

Постановка задачи

Задача состоит в том, чтобы для каплей размером меньше 10^{-7} м вывести новое условие равновесия, учитывающее влияние поверхностного слоя капли, его толщину и упругие свойства; вычислить угол смачивания капли.

Для висящей капли в модели Дерягина, учитывающей толщину поверхностного слоя, выразить разность давлений внутри и снаружи капли, вычислить энергию формирования поверхностного слоя, ранжировать общую энергию капли, угол смачивания, разность давлений внутри и снаружи капли.

Для висящей осесимметрической капли, поверхность вращения которой задается кривой $(x(s), y(s))$, где s – длина дуги кривой, построить функционал полной энергии капли.

Выписать функционал полной энергии капли, определенный на допустимых поверхностях, включающий в себя функционал энергии формирования поверхностного слоя капли.

На допустимых поверхностях решить вариационную задачу нахождения экстремальной поверхности, соответствующую определению экстремума функционала полной энергии капли.

Записать условие равновесия осесимметрической капли с помощью средней, гауссовой кривизны и лапласиана средней кривизны.

С помощью решения вариационной задачи, используя краевые условия в точке примыкания образующей линии, вычислить угол смачивания капли.

Результаты

Чтобы учесть влияние промежуточного слоя, был вычислен функционал потенциальной энергии, формирующей промежуточный слой между жидкостью и газом. Для этого было выведено новое уравнение равновесия капли для однородного промежуточного слоя, учитывающее замечания авторов работы [10]:

$$g\rho x(s) + \lambda = P_1 - P_2 = \sigma_{LG}[2H + Kh_m], \quad (2)$$

где P_1 – давление жидкости; P_2 – давление газа; $2H$ – средняя кривизна поверхности; K – гауссова кривизна.

В данной работе осуществлен переход от модели с поверхностным слоем нулевой толщины к модели Дерягина расклинивания поверхностного слоя, в нулевой момент задаваемого поверхностью Гиббса $r(u, v)$. Внешняя и внутренняя границы этого слоя в момент τ будут задаваться функциями $g_1(u, v, \tau)$ и $g_2(u, v, \tau)$ соответственно. Процесс расклинивания представлен на рис. 3.

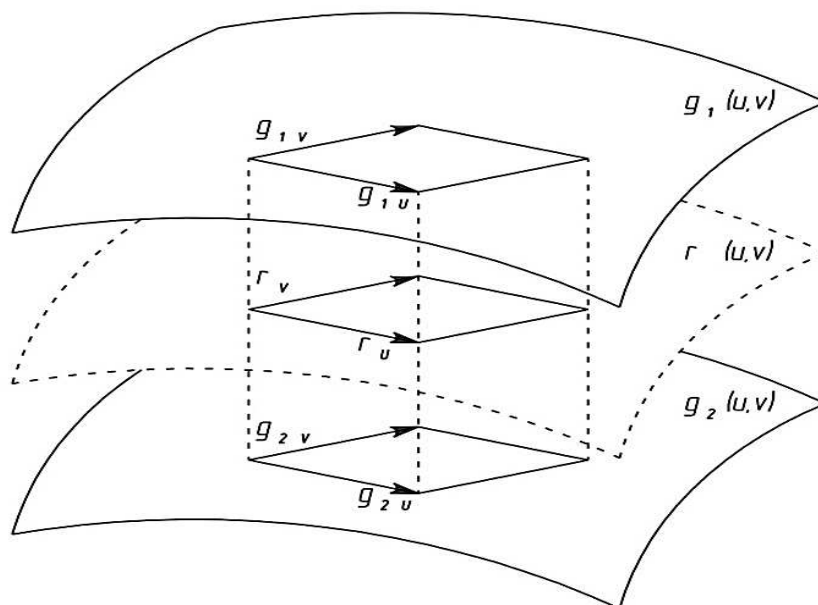


Рис. 3. Расклинивание поверхности Гиббса и формирование промежуточного слоя
 / Fig. 3. Wedging of the Gibbs surface and formation of an intermediate layer

В момент τ положение границ относительно поверхности Гиббса $r(u, v)$ определяется формулами:

$$g_1(u, v, \tau) = r(u, v) + \mathbf{n}(u, v) \int_0^\tau \omega_1(u, v) dt, \quad (3)$$

$$g_2(u, v, \tau) = r(u, v) - \mathbf{n}(u, v) \int_0^\tau \omega_2(u, v) dt, \quad (4)$$

где $\mathbf{n}(u, v)$ – вектор нормали поверхности $r(u, v)$; $\omega_1(u, v), \omega_2(u, v)$ – скорость смещения точки $r(u, v)$ по нормали наружу и вовнутрь.

В капиллярной теории равенство, определяющее разность давлений, имеет вид

$$P_1 - P_2 = \frac{\sigma_{LG} \Delta S}{\Delta V}. \quad (5)$$

Применяя обозначения (3), (4), приводим (5) к виду

$$P_1 - P_2 = \frac{\sigma_{LG} (|\mathbf{g}_{1u} \times \mathbf{g}_{1v} - \mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v| + |\mathbf{g}_{2u} \times \mathbf{g}_{2v} - \mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v|)}{|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v|} \left(\int_0^\tau (\omega_1 + \omega_2) dt \right)^{-1}. \quad (6)$$

Используя дериационные формулы Вайнгартена, из (6) получаем

$$P_1 - P_2 = \frac{2\sigma_{LG}|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v| [K(R(\tau))^2 + 2HR(\tau)]}{|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v|R(\tau)}, \quad (7)$$

где $R(\tau)$ – расстояние между расходящимися поверхностями в момент τ ; $R(\tau) := \int_0^\tau (\omega_1 + \omega_2) dt$.

Расклинивающий слой за конечное время приобретает толщину $\lim_{\tau \rightarrow \infty} R(\tau) = h_m$. Переходя к пределу в (7), получим формулу (2).

Для капли, поверхность вращения которой параметрически задается образующей линией $((x(s)), y(s))$ ($s \in [0, L]$ – натуральный параметр; $x(s) = x_1(y(s))$), первая вариация функционала полной энергии без учета расклинивающей и упругой энергий

$$\delta_1(E(S, \lambda)) = 2\pi \varepsilon \int_0^L [\sigma_{LG}(2H(s)) - (g\rho x(s) + \lambda)] t(s) \dot{y}(s) y(s) ds,$$

где $t(s)$ – финитная функция, носитель которой находится в произвольно малой окрестности $s \in [0, L]$. Приравнивание её к нулю даёт классическое уравнение равновесия капли $P_1 - P_2 = \sigma_{LG}(2H(s))$.

В нашей модели уравнение равновесия задается формулой (2). Чтобы получить её аналогичным образом, необходимо дополнить функционал полной энергии элементом, первая вариация которого под интегралом есть $[\sigma_{LG}K] t(s) \dot{y}(s) y(s)$.

Из предположения, что этот элемент – интеграл по поверхности капли от некоторой неизвестной функции f , зависящей от изменения метрики на поверхности, т.е.

$E_{\text{раскл}}(S) = 2\pi \sigma_{LG} h_m \int_0^L f(\dot{x}(s)) ds$, было определено в [11–13], что $f(\tau)$ есть решение дифференциального уравнения $\sqrt{1 - \tau^2} \frac{d^2 f}{d\tau^2} - \frac{\tau}{\sqrt{1 - \tau^2}} \frac{df}{d\tau} + \frac{f}{\sqrt{1 - \tau^2}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \tau^2}}$, решив которое нашли, что

$$E_{\text{раскл}}(S) = -\pi h_m \sigma_{LG} \int_0^L \dot{y} \arcsin \dot{x} ds.$$

Уравнение равновесия с учетом действия расклинивающего слоя имеет вид

$$\varepsilon_{\text{пот.я.}} \pi \gamma_{12}^1 [H + K/2 h_m] + \varepsilon^3_{\text{пот.я.}} \frac{\pi}{16} \gamma_{12}^3 [\Delta_s(H) + 2H^3 - 2HK] + \bar{O}(\varepsilon^4) = g\rho x(s) + \lambda. \quad (8)$$

Предполагая, что ширина потенциальной ямы соизмерима с толщиной расклинивающего слоя ($\varepsilon_{\text{пот.я.}} \approx h_m$), получили, используя (8), в модели, учитывающей как энергию формирования промежуточного слоя, так и его упругую энергию, уравнение, определяющее равновесную каплю:

$$\varepsilon_{\text{пот.я.}} \pi \gamma_{12}^1 H + \varepsilon^2_{\text{пот.я.}} \frac{\pi}{2} \gamma_{12}^1 \cdot K + \varepsilon^3_{\text{пот.я.}} \frac{\pi}{16} \gamma_{12}^3 [\Delta_s(H) + 2H^3 - 2HK] + \bar{O}(\varepsilon^4_{\text{пот.я.}}) = g\rho x(s) + \lambda. \quad (9)$$

В равенстве (9) по сравнению с (1) появился элемент $\varepsilon^2_{\text{пот.я.}} \frac{\pi}{2} \gamma_{12}^1 K$.

Вклад каждой энергии в уравнение равновесия (9) оценен по степени диапазона межмолекулярного потенциала, деленного на типичный размер жидкости $\varepsilon_{\text{пот.я.}}$. Главный член в уравнении – элемент, соответствующий вкладу гравитационной энергии ($g\rho x(s)$). Следующий по значимости – соответствующий вкладу энергии поверхностного натяжения ($\varepsilon_{\text{пот.я.}} \pi \gamma_{12}^1 H$). Расклинивающая энергия, соответствующая элементу $\varepsilon^2_{\text{пот.я.}} \frac{\pi}{2} \gamma_{12}^1 K$, является следующей по значимости и вносит значительную поправку лишь для капель, диаметр которых меньше 10 нм. Упругая энергия капли, соответствующая элементу $\varepsilon^3_{\text{пот.я.}} \frac{\pi}{16} \gamma_{12}^3 [\Delta_s(H) + 2H^3 - 2HK]$, вносит наименьший вклад в общую энергию капли.

В силу того, что первая вариация функционала полной энергии равна нулю в точке контакта капли с твердой поверхностью, получили формулу зависимости контактного угла θ от радиуса пятна прилипания Y_A , уточняющую результат для капель с характерным размером < 10 нм:

$$\cos \theta = \frac{(\sigma_{SG} - \sigma_{SL})}{\sigma_{LG}} + \frac{h_m}{4Y_A} [2\theta_0 + \pi + \sin 2\theta_0], \quad (10)$$

где $\sigma_{LG}, \sigma_{SG}, \sigma_{SL}$ – коэффициенты поверхностного натяжения капли на границе с жидкостью, газом и твердой поверхностью; θ_0 – угол смачивания, определяемый классической формулой Юнга – Лапласа; Y_A – радиус пятна прилипания.

Для сравнения рассмотрены различные классические модели, определяющие по высоте висящей капли её угол смачивания (на примере капли гептана) (таблица):

- YL [1, 2] – поверхность равновесной капли, определяемая как решение вариационной задачи, удовлетворяет классическому уравнению Лапласа (рис. 4, кривая 1), угол смачивания задается формулой Юнга $\cos \theta = \frac{(\sigma_{SG} - \sigma_{SL})}{\sigma_{LG}}$;
- AYL [14] – поверхность равновесной капли определяется с учетом толщины расклинивающего слоя h_m (рис. 4, кривая 2); угол смачивания определяется по формуле $\cos \theta = \cos \theta_0 - \ln \left[1 - \frac{1}{2} \frac{h_m^2}{h^2} \right]$;
- RSM [11–13], учитывающая расклинивающую энергию промежуточного слоя, угол смачивания определяется формулой (10) (рис. 4, кривая 3).

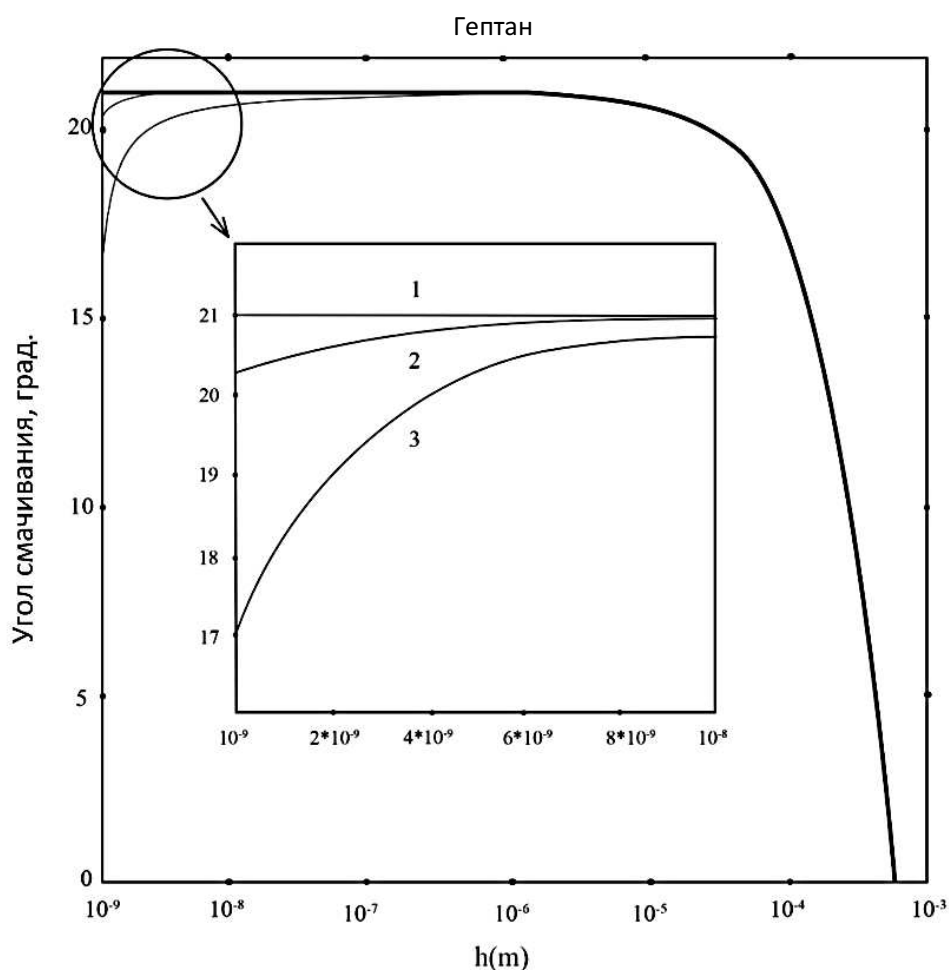


Рис. 4. Угол смачивания капли гептана в зависимости от высоты капли h для физических моделей: 1 – YL; 2 – AYL; 3 – RSM / Fig. 4. The wetting angle of the heptane droplet depending on the height of the drop h for physical models: 1 - YL; 2 - AYL; 3 - RSM

Значения угла смачивания капли гептана для различных моделей в зависимости от высоты капли / Values of the wetting angle of the heptane droplet for different models depending on the height of the droplet

Модель	Угол смачивания, град.		
	h		
	$\approx 10^{-9}$ м	$\approx 10^{-8}$ м	$\approx 10^{-7}$ м
YL	21	21	21
AYL	20,3	20,95	21
RSM	17	20,72	20,97

Заклучение

На примере капли гептана показано, что для капель высотой меньше чем 10^{-8} м RSM-метод, учитывающий в поверхностном слое расклинивающее давление, отличается от классического результата γ_L в зависимости от величины капли на величину от 1 до 20 %. Сравнение угла смачивания для капли $\approx 10^{-8}$ м, вычисленного RSM-методом, с углом, вычисленным методом AYL, построенном на основе численных методов и экспериментов, позволяет предположить, что RSM-метод уточняет классический результат благодаря учету действия поверхностного слоя ненулевой толщины между фазами жидкости и газа. Для дальнейшего уточнения классического результата необходимо рассматривать модели с неоднородным поверхностным слоем [15] и неосесимметрические капли.

Список источников

1. Young T. An Essay on the Cohesion of Fluids // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1805. Vol. 95. P. 65.
2. Laplace P.S. *Théorie de l'action capillaire. Supplément au dixième livre du traité de mécanique céleste*. Paris: Courcier, 1806. P. 143.
3. Мышкис А.Д., Бабский В.Г., Копачевский Н.Д., Слобожанин Л.А., Тюпцов А.Д. Гидромеханика невесомости / под ред. А.Д. Мышкиса. М.: Наука, 1976. 504 с.
4. Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Копачевский Н.Д., Слобожанин Л.А., Тюпцов А.Д. Методы решения задач гидромеханики для условий невесомости. Киев: Наукова думка, 1992. 590 с.
5. Keller J.B., Merchant G.J. Flexural Rigidity of a Liquid Surface // *J. of Statistical Physics*. 1991. Vol. 63, № 5/6. P. 1039–1051.
6. Финн Р. Равновесные капиллярные поверхности. Математическая теория. М.: Мир, 1989. 310 с.
7. Дерягин Б.Я., Обухов Е.В. Аномальные свойства тонких слоев жидкостей // *Коллоид. журн.* 1935. Т. 1, № 5. С. 385–398.
8. Дерягин Б.В., Кусаков М.М. Свойства тонких слоев жидкостей // *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 1936. №5, С. 741–753.
9. Дерягин Б.В. Теория капиллярной конденсации и других капиллярных явлений с учетом расклинивающего действия полимолекулярных жидких пленок // *Журн. физ. химии*. 1940. Т. 14, вып. 2. С. 137–280.
10. Коровкин В.П., Секриеру Г.В., Сажин Ф.М. Анализ связи капиллярного и расклинивающего давления // *Математические исследования*. Кишинев, 1989. Т. 108. С. 27–32.
11. Щербаков Е.А., Щербаков М.Е. О равновесии подвешенной капли с учетом изгибной жесткости промежуточного слоя // *Докл. РАН. Физика, техн. науки*. 2012. Т. 53, № 6. С. 243–244.
12. Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н. Энергия формирования промежуточного слоя. Ранжирование энергий капли // *Осенние математические чтения в Адыгее: материалы четвертой Междунар. науч. конф.* Майкоп, 2021. С. 299.
13. Щербаков М.Е. О союзном функционале гауссовой кривизны и равновесных формах жидких капель // *Экол. вестн. науч. центров Черноморского экон. сотрудничества*. 2019. № 1. С. 6–12.
14. Diaz M.E., Fuentes J., Cerro R.L., Savage M.D. An analytical solution for a partially wetting puddle and the location of the static contact angle // *J. of Colloid and Interface Science*. 2010. Vol. 1, № 348. P. 232–239.
15. Gruber A. Curvature Functionals and p-Willmore Energy. Florida State University, 2019. 112 p.

References

1. Young T. An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1805;95:65.
2. Laplace P.S. *Theory of capillary action. Supplement to the tenth book of the treatise on celestial mechanics*. Paris: Courcier Publ.; 1806. (In French).
3. Myshkis A.D., Babsky V.G., Kopachevsky N.D., Slobozhanin L.A., Tyuptsov A.D. *Weightlessness hydromechanics*. Ed. by A. D. Myshkis. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 504 p. (In Russ.).
4. Babsky V.G., Zhukov M.Yu., Kopachevsky N.D., Slobozhanin L.A., Tyuptsov A.D. *Methods of solving problems of hydromechanics for weightlessness conditions*. Kyiv: Naukova dumka Publ.; 1992. 590 p. (In Russ.).
5. Keller J.B., Merchant G.J. Flexural Rigidity of a Liquid Surface. *Journal of Statistical Physics*. 1991;63(5/6):1039-1051.
6. Finn R. *Equilibrium capillary surfaces. Mathematical theory*. Moscow: Mir Publ.; 1989. 310 p. (In Russ.).

7. Deryagin B.Ya., Obukhov E.V. Anomalous properties of thin layers of liquids. *Kolloid. zhurn. = Colloidal Journal*. 1935;1(5):385-398. (In Russ.).
8. Deryagin B. V., Kusakov M. M. Properties of thin layers of liquids. *Izv. AN SSSR. Ser. khim. = Russian Chemical Bulletin*. 1936;(5):741-753. (In Russ.).
9. Deryagin B.V. Theory of condensation capillaries and other capillary phenomena taking into account the wedging action of polymolecular liquid films. *Zhurn. fiz. khimii = Russian Journal of Physical Chemistry A*. 1940;14(2):137-280. (In Russ.).
10. Korovkin V.P., Sekrieru G.V., Sazhin F.M. Analysis of the relationship between capillary and wedging pressure. *Matematicheskie issledovaniya = Mathematical research* (Chisinau). 1989;108:27-32. (In Russ.).
11. Shcherbakov E.A., Shcherbakov M.E. On the equilibrium of a suspended drop taking into account the bending stiffness of the intermediate layer. *Dokl. RAN. Fizika, tekhn. nauki = Doklady Physics*. 2012;53(6):243-244. (In Russ.).
12. Shcherbakov M.E., Kalaidin E.N. The energy of the formation of the intermediate layer. Ranking of drop energies. *Autumn mathematical readings in Adygea*. Materials of the Fourth International Scientific Conference. Maykop, 2021:299. (In Russ.).
13. Shcherbakov M.E. On the union functional of Gaussian curvature and equilibrium forms of liquid droplets. *Ekol. vestn. nauch. tsentrov Chernomorskogo ekonom. sotrudnichestva = Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2019;(1):6-12. (In Russ.).
14. Diaz M.E., Fuentes J., Cerro R.L., Savage M.D. An analytical solution for a partially wetting puddle and the location of the static contact angle. *J. of Colloid and Interface Science*. 2010;1(348):232-239.
15. Gruber A. *Curvature Functionals and p-Willmore Energy*. Florida State University, 2019:112.

Информация об авторах

М.Е. Щербаков – преподаватель.

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

Information about the authors

M.E. Shcherbakov - Lecturer.

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

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 16.01.2023; approved after reviewing 20.03.2023; accepted for publication 19.05.2023.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 631.481:536.7:550.4.01 (470)

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-64-74

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЧЕРНОЗЕМОВ СЕВЕРНОГО ПРИАЗОВЬЯ И КРЫМА

Елена Ивановна Ергина^{1✉}, Ольга Степановна Безуглова²

¹Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Республика Крым, Россия

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ergina65@mail.ru✉

²lola314@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются современные подходы к изучению процессов выветривания и почвообразования. Дана сравнительная характеристика по этим вопросам черноземов миграционно-сегрегационных (обыкновенных карбонатных) и черноземов текстурно-карбонатных (южных), сформировавшихся в условиях степных районов Крыма и Ростовской области. Для определения относительного возраста почв и выяснения соотношения процессов почвообразования и выветривания использованы литохимические индексы: *SIA*, характеризующий степень выветривания почв и их минералогические особенности, и *SIW* – для определения степени зрелости тонкой алюмосиликокластики. Исходными данными для таких реконструкций служат результаты определения валового химического (элементного) состава почв и пород. Рассчитаны также молярные отношения кремнезема к полторным оксидам ($SiO_2:R_2O_3$) и коэффициент элювирования (*Kэ*) (без учета натрия) в почвах и почвообразующих породах.

Установлено, что относительный возраст черноземов Крымского полуострова меньше, чем у аналогичных подтипов черноземов Ростовской области. Обусловлено это прежде всего особенностями почвообразующего материала: в Ростовской области черноземы формируются на более выветрелых глинистых материнских породах, в то время как образование черноземов Крыма приурочено преимущественно к элювию осадочных пород. Вниз по профилю интенсивность процессов почвообразования и выветривания в почвах Северного Приазовья и Крыма заметно снижается вследствие уменьшения темпов вторичного выветривания минералов, что обусловлено ограниченностью энергетических характеристик среды, в которой происходят эти процессы. Среди таких ограничивающих факторов следует в первую очередь назвать недостаточное количество влаги в весенне-летний период.

Ключевые слова: Крымский полуостров, Ростовская область, черноземы, валовой химический состав, литохимические индексы, почвообразование

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030») и Программы стратегического академического лидерства Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского («Приоритет 2030»).

Для цитирования: Ергина Е.И., Безуглова О.С. Сравнительная характеристика литохимических особенностей черноземов северного Приазовья и Крыма // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 64–74.

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

Original article

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF THE LITHOCHEMICAL FEATURES OF CHERNOZEMS IN THE NORTHERN AZOV SEA REGION AND CRIMEA

Elena I. Ergina^{1✉}, Olga S. Bezuglova²

¹ Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

² Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ergina65@mail.ru[✉]

²lola314@mail.ru

Abstract. The article discusses modern approaches to the study of weathering and soil formation processes in soils. It offers comparative characteristics of migration-segregation (ordinary carbonate) chernozems and textural-calcareous (southern) chernozems formed under conditions of the steppe regions in the Crimea and Rostov region. Lithochemical indices were used to determine the relative age of soils and establish the relationship between soil formation and weathering. CIA index characterizes the degree of soil weathering and its mineralogical features, while CIW index determines the degree of maturity of fine aluminosiliciclastics. The determined gross chemical (elemental) composition of soils and rocks formed the initial data for such reconstructions. In addition, the research included calculations of the molar ratios of silica to sesquioxides ($\text{SiO}_2:\text{R}_2\text{O}_3$) and the eluviation coefficient (K_e) (excluding sodium) in soils and soil-forming rocks.

It has been established that the relative age of chernozems in the Crimean Peninsula is less compared to the similar subtypes of chernozems in the Rostov region. This is due to the peculiarities of the soil-forming material. In the Rostov region, chernozems are formed on more weathered clay parent rocks, while the formation of Crimean chernozems is confined mainly to the eluvium of sedimentary rocks. Down the profile, the intensity of soil formation and weathering processes in the soils of the South and South-East of the East European Plain noticeably decreases due to a lower rate of secondary weathering of minerals. This can be explained by the limited energy characteristics of the environment in which these processes occur. Among such limiting environmental factors, on the major factors are an insufficient amount of moisture in the spring-summer period.

Keywords: Crimean peninsula, Rostov region, chernozems, gross chemical composition, lithochemical indices, soil formation

Acknowledgments: the study was supported by the Strategic Academic Leadership Program of the Southern Federal University ("Priority 2030") and the Strategic Academic Leadership Program of the Vernadsky Crimean Federal University ("Priority 2030").

For citation: Ergina E.I., Bezuglova O.S. Comparative Characteristics of the Lithochemical Features of Chernozems in The Northern Azov Sea Region and Crimea. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):64-74. (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

Сравнительная характеристика черноземов южных регионов России представляет интерес в силу достаточно явных различий в условиях формирования и в то же время наличия многих общих черт в генезисе, эволюции и в конечном итоге свойствах этих почв. Современные полноразвитые почвы региона формировались в течение достаточно длительного периода, но в последнее время наблюдается значительная региональная специфика в динамике природных условий, взаимодействии природы и общества, что находит отражение в направленности современных процессов почвообразования, которая носит ярко выраженную обусловленность палеоэкологическими факторами среды. Основные положения эволюции почв Юга России достаточно полно сформулированы в работах отечественных и зарубежных почвоведов [1–10]. В изучении генезиса и эволюции современных почв первостепенное значение имеет комплексное использование почвенных (профильный, морфологический, сравнительно-исторический и др.), а также геологических, палеоклиматических, палеогеохимических и прочих методов исследований. Они позволяют выявить в почвенной толще эволюционные закономерности формирования ее состава и свойств в зависимости от литогеохимических и биоклиматических фаз развития территории, в течение которых менялось направление почвообразования.

Достаточно информативным методом для изучения особенностей почвообразования является валовой химический анализ, позволяющий определить элементный состав почвенной массы отдельных генетических горизонтов и выявить наиболее важные итоги почвообразовательного процесса. Например, анализ распределения компонентов валового химического состава по профилю черноземов позволил установить закономерность постепенного убывания с глубиной количества углерода органических соединений и относительно равномерное распределение других элементов. Это свидетельствует о том, что в черноземной почве не происходит заметного перераспределения по профилю кремния, алюминия и железа – главных составляющих минеральной части почвы, а одним из главных процессов является прогрессирующее накопление гумуса без последующего его переноса в профиле. Однако обычная интерпретация данных элементного состава путем построения профильных графиков не дает возможности выявить те процессы, которые связаны с перестройкой веществ *in situ*, если эта трансформация не сопровождается пространственной дифференциацией почвенной массы.

Достаточно актуальными в последнее время стали геохимические исследования с применением различных литохимических коэффициентов. Дополненные петрофизическими и минералогическими сведениями, они позволяют выявлять изменения в свойствах материнских пород и почв. Исходными данными для таких реконструкций служат результаты определения валового химического (элементного) состава почв и пород. С помощью такой интерпретации удастся проводить палеогеографические реконструкции природной среды, геохимический анализ современных и прошлых условий почвообразования и выветривания, идентификацию свойств почв, унаследованных от предыдущих этапов ее эволюционного развития.

Цель данной работы – выявление литохимических особенностей почв юго-западного региона России – черноземов миграционно-сегрегационных (обыкновенных карбонатных по классификации почв СССР [11]) и черноземов текстурно-карбонатных (черноземов южных по версии [11]), расположенных в Ростовской области и на Крымском полуострове. Означенные территории в настоящее время характеризуются как общностью некоторых условий почвообразования, так и существенными отличиями. Тем не менее в составе почвенного покрова обоих регионов присутствуют вышеперечисленные подтипы черноземов, и уже один этот факт делает весьма интересным и актуальным анализ причин формирования сходных почв на достаточно разнородных основах.

Материалы и методы

Основные черты природы Крымского полуострова обусловлены географическим положением, морским окружением и особенностями геологического и тектонического развития территории, которые привели к формированию генетически разнородных участков: равнинного Крыма и горного Крыма [12].

На территории Крымского полуострова исследуемые почвы расположены в автономных элювиальных геохимических ландшафтах в границах Центральной-Крымской равнины (Красногвардейский район) и предгорного Крыма (Симферопольский район) (рис. 1).

Территория равнинного Крыма с господствующими в структуре почвенного покрова черноземами характеризуется умеренным мягким климатом со значительным числом часов солнечного сияния, относительно мягкой зимой, жарким летом и дефицитом атмосферной влаги практически на всей территории. Пространственная изменчивость температуры воздуха довольно значительная. Средняя температура воздуха в июле колеблется в пределах 20,0–22,1 °С, в январе – 2,3 ... +0,3. Количество осадков за год составляет менее 350 мм (на побережье северной и северо-западной части равнинного Крыма и северо-западной и южной части Керченского полуострова), 350–400 мм – в Присивашье и в западной части равнинного Крыма, в центральной части возрастает до 400–450 мм (табл. 1). Крымские черноземы текстурно-карбонатные (черноземы южные) в равнинной части сформированы в основном на лессовидных породах на красно-бурых плиоценовых глинах, сарматских и майкопских засоленных глинах, а также на продуктах выветривания известняков и конгломератах. Черноземы южные чаще всего представлены малогумусными и слабогумусированными родами средне- и маломощными. Мощность гумусовых горизонтов (А+АВ) колеблется в пределах 48–70 см. На окраску значительно влияют свойства материнских пород. Белоглазка наблюдается на глубине 70–80 см, гипс – со 150–200 см. Содержание гумуса в среднем от 2,5 до 3,5 %, рН 6,8–8,0. Сумма поглощенных оснований 30–40 мг-экв. на 100 г. Для черноземов Крыма характерна высокая карбонатность [13].

К наименованию черноземов, сформировавшихся в предгорьях, традиционно добавляется термин «предгорные», что отвечает экологическим условиям формирования и своеобразию их профиля [14]. Среди них преобладают карбонатные роды, сформированные на элювии и смешанных элювиально-делювиальных отложениях карбонатных пород и глинисто-галечниковых накоплениях. Черноземы предгорные карбонатные на щебнисто-галечниковых суглинках (черноземы обыкновенные предгорные карбонатные [15]) средне- и маломощные характеризуются сильной скелетностью, представленной преимущественно галькой, иногда с примесью хряща и щебня. Мощность гумусированной части профиля достигает 60–70 см. Верхний переходный горизонт (АВ₁) мощностью 15–25 см имеет выцветы карбонатов. В нижнем переходном горизонте (В_{2сa}) мощностью 10–20 см наблюдается обильная карбонатная плесень. Почвообразующая порода (С_{ca}) содержит много гальки, иногда – щебня и хряща, местами встречается белоглазка. В толще породы попадаются сцементированные карбонатами галечниковые прослойки, которые могут залегать с глубины 130–150 см. Содержание гумуса на целине достигает 4,8–5,8 %, в распахиваемых почвах не превышает 2,4–3,0 %, Количество валового азота в целинных почвах в верхней части гумусового слоя составляет 0,32–0,42 %, фосфора – 0,14–0,15, калия – 0,8–0,9 % [13].

В Ростовской области разрезы были заложены на черноземах, также в автономных элювиальных геохимических ландшафтах в пределах Приазовской наклонной равнины и Доно-Донецкой возвышенности (рис. 1).

Климат территории Ростовской области определяется близостью Азовского и Черного морей на западе и высокими хребтами Кавказа на юге. Такое географическое положение обуславливает мягкую, малоснежную, с частыми оттепелями зиму, умеренно жаркое лето, значительную продолжительность безморозного периода, высокую сумму положительных температур и большее по сравнению с Крымом количество осадков. В то же время открытость с севера и северо-востока предопределяет проникновение холодных потоков воздуха с Восточно-Европейской равнины [16].

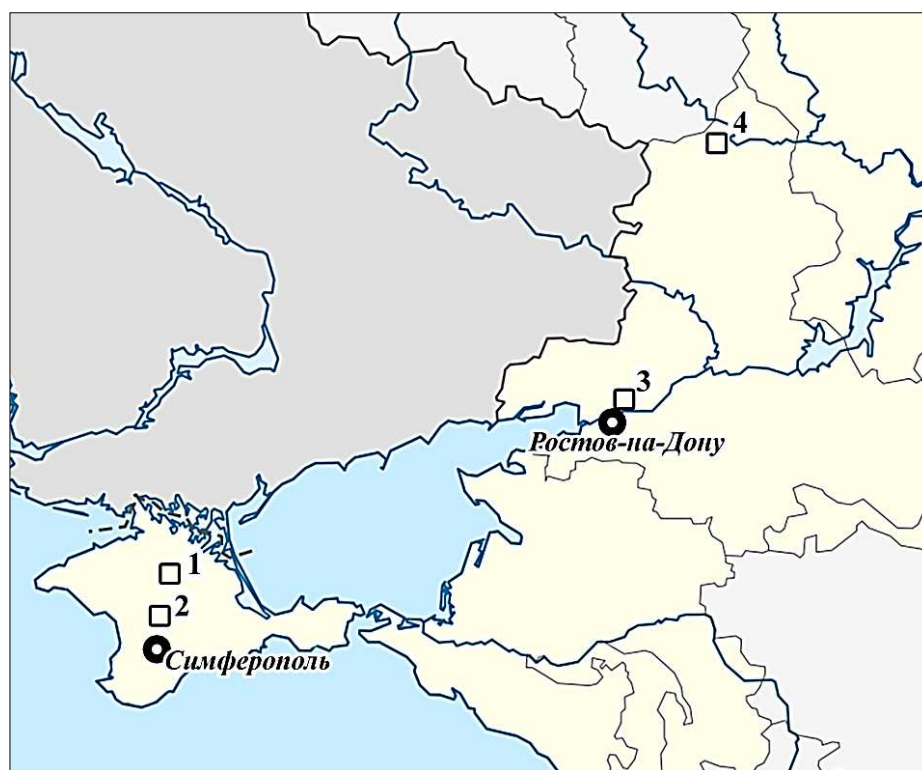


Рис. 1. Расположение разрезов в пределах региона: 1 – черноземы текстурно-карбонатные (южные, южные карбонатные, южные мицелярно-карбонатные); 2 – черноземы миграционно-сегрегационные (черноземы обыкновенные предгорные карбонатные); 3 – черноземы миграционно-сегрегационные (обыкновенные карбонатные); 4 – черноземы текстурно-карбонатные (черноземы южные) / Fig. 1. Location of cuts in the region: 1 - texture-carbonate chernozems (southern, southern carbonate, southern micellar-carbonate); 2 - migration-segregation chernozems (ordinary piedmont calcareous chernozems); 3 - migration-segregation chernozems (ordinary carbonate); 4 - texture-calcareous chernozems (southern chernozems)

Таблица 1 / Table 1

Климатические условия формирования черноземов районов исследования
/ **Climatic conditions for the formation of chernozems in the study areas**

Геоморфологическая принадлежность, административный регион	Почвенные фации и провинции	Преобладающие почвы	ГТК ¹	Годовое количество осадков, мм	Эффективные осадки, мм ²	Сумма t > 10 °С	Безморозный период, дни
Приазовская наклонная равнина, Ростовская область	Южно-Европейская теплая (теплая кратковременно промерзающих почв), Предкавказская	Черноземы миграционно-сегрегационные (обыкновенные карбонатные)	0,7	620	360	3300	160–180
Доно-Донецкая возвышенность, Ростовская область	Восточно-Европейская умеренно-теплая (теплая промерзающая), Южно-Русская	Черноземы текстурно-карбонатные (черноземы южные)	0,7–0,8	430	230	3000	160–170
Центрально-Крымская равнина, Республика Крым	Южно-Европейская теплая (теплая кратковременно промерзающих почв), Южно-Украинская	Черноземы текстурно-карбонатные (южные, южные карбонатные, южные мицелярно-карбонатные)	0,70	360–400	170–220	3280–3335	165–200
Предгорье внешней гряды Крымских гор, Республика Крым	Южно-Европейская теплая (теплая кратковременно промерзающих почв), Южно-Украинская	Черноземы миграционно-сегрегационные (черноземы обыкновенные предгорные карбонатные)	0,90	450–500	180–240	3110–3160	165–200

Примечание. ¹ – ГТК = $\Sigma(r > 10/0,1 t > 10)$, где $r > 10$ – сумма осадков за период с температурами выше +10 °С, мм; $t > 10$ – сумма температур за то же время, °С; ² – количество усвоенных почвой осадков соответствует годовой сумме осадков, за исключением выпавших в жаркий период (среднесуточная температура выше 20 °С).

Черноземы миграционно-сегрегационные [15]: этот подтип чернозема составляет основу почвенного покрова Приазовской наклонной равнины, простирающейся от Донецкого поднятия до берегов Азовского моря и реки Дон. Территория относится к теплой кратковременно промерзающей фации. Почвы представлены преимущественно легкоглинистыми, реже – тяжелосуглинистыми разновидностями [17]. Они сформированы большей частью на лессовидных глинах и суглинках, изредка встречаются на желто-бурых структурных глинах. Верхняя часть профиля имеет темно-серую с бурым оттенком окраску, которая книзу постепенно светлеет и сменяется серо-бурым и бурым тоном.

Мощность гумусовых горизонтов чаще всего 87–91 см, начало вскипания в карбонатных почвах – с поверхности, в некарбонатных – с 60–65 см. Карбонатная плесень начинается, соответственно, с 60 и 70 см, белоглазка появляется со 100–110 см. Гипс в большинстве случаев находится глубже 300 см, но встречается и на глубине 220–230 см [18]. Содержание гумуса в пахотном слое составляет 4,6–4,7 %, а общие запасы его в гумусовых горизонтах – 345–385 т/га. Количество валового азота 0,20–0,25 %, фосфора – 0,11–0,16, калия – 2,3 %. Содержание подвижной фосфорной кислоты преимущественно низкое и очень низкое (в пахотном слое – 0,6–1,5 мг на 100 г почвы), обменного калия – повышенное (30,0–47,0 мг на 100 г почвы). Обеспеченность легкогидролизуемым азотом непостоянна: при неблагоприятных для микробиологических процессов гидротермических условиях количество усвояемых форм азота недостаточно для нормального развития сельскохозяйственных культур. Реакция почвенной среды в верхней части профиля слабощелочная (рН равно 8,0), в нижней – среднещелочная (рН 8,0–8,5).

Второй подтип – черноземы текстурно-карбонатные [15] – характерен для северных и центральных районов Ростовской области, на их долю приходится 30 % ее территории. Профиль состоит из темногумусового горизонта небольшой мощности (не более 40–50 см), с относительно

грубой, близкой к ореховатой структурой и языковатой нижней границей. Карбонатные новообразования сосредоточены в текстурно-карбонатном горизонте и представлены белоглазкой, располагающейся преимущественно вблизи трещин. Черноземы текстурно-карбонатные характеризуются еще более низким содержанием гумуса в верхнем горизонте – 3–5 %. В нижней части профиля часто присутствуют гипс и водорастворимые соли.

Валовой химический состав почвы определяли по методике измерений массовой доли металлов и их оксидов в порошковых образцах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе «Спектроскан МАКС-GV».

На основе данных валового содержания макро- и микроэлементов в исследуемых почвах рассчитаны значения литохимических индексов CIA и CIW, которые в настоящее время находят все большее применение в почвенно-генетических исследованиях в силу их информативности при изучении генезиса и эволюции почв.

Индекс CIA характеризует степень выветривания почв и пород и их минералогические особенности, степень зрелости тонкой алюмосиликокластики отражает индекс CIW [19, 20]. Коэффициенты рассчитываются по формулам:

$$CIA = 100 \cdot Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O),$$

$$CIW = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + TiO_2) / Al_2O_3.$$

Кроме того, нами рассчитаны молярные отношения кремнезема к полуторным оксидам ($SiO_2:R_2O_3$) и коэффициент элювирования (Кэ) (без учета натрия) в почвах и почвообразовательных породах, определяемый по формуле [21, 22] $K_э = SiO_2: (RO + R_2O)$.

Для почв исследуемого региона такое расширение оправдано, так как позволяет диагностировать накопления не только минералов оксидов железа и алюминия в тонкодисперсных гранулометрических фракциях, но и минералов-солей, поступающих путем аэрации из акватории Черного моря. Данные расчетов литохимических коэффициентов приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

**Литохимические индексы черноземов территории исследования
/ Lithochemical indices of chernozems in the study area**

Почва	Глубина, см	SiO ₂ : R ₂ O ₃	Кэ	CIA	CIW×10
Чернозем предгорный карбонатный на щебнисто-галечниковых суглинках (Крымский полуостров)	0–26	7,30	11,70	60,24	10,91
	26–42	6,45	11,67	58,16	11,78
	42–60	5,89	5,64	43,85	17,55
	60–80	5,65	3,39	31,66	25,87
	80–100	6,19	1,97	20,18	43,50
Чернозем южный на желто-бурых лессовидных отложениях (Крымский полуостров)	0–24	3,35	10,83	73,18	9,38
	24–48	3,13	9,42	73,33	9,54
	48–60	3,08	5,80	59,73	13,57
	60–160	3,42	4,18	49,29	17,11
	160–180	3,19	8,69	68,75	10,83
Чернозем обыкновенный карбонатный мощный на лессовидном суглинке (Ростовская область)	0–25	4,06	14,02	76,26	9,19
	25–40	4,04	13,56	75,69	9,20
	40–60	3,99	9,10	65,84	11,24
	60–80	3,93	5,56	54,76	14,83
	80–105	3,78	4,80	46,14	18,59
	105–120	3,83	3,64	44,93	19,21
Чернозем южный среднемощный на красно-бурой глине, подстилаемой элювием песчаника (Ростовская область)	0–5	5,41	22,87	79,20	8,42
	5–20	4,45	21,33	81,97	7,64
	20–30	4,72	26,21	84,86	6,73
	30–45	4,09	26,74	87,12	5,92
	45–55	4,80	38,34	89,80	5,14
	55–80	3,16	27,71	90,57	4,96
120–140	5,64	33,71	86,18	5,00	

Результаты и их обсуждение

Для характеристики направленности процессов эволюции, генезиса почв и почвообразующего потенциала геосистем уместно использовать высказанную ранее концепцию почвообразующего потенциала природных факторов (ПППФ) [23]. С.А. Шоба с соавторами предложил вариант определения ПППФ как способности формировать из любого твердофазного субстрата сложноорганизованные почвенные тела и почвенные системы в узкое понятие «частные почвообразующие потенциалы» (ПП, или ЧПП), среди которых особый интерес представляет оценка ПП материнских пород или исходного субстрата, анализ которого мы проведем далее с использованием литохимических индексов.

Коэффициент элювиирования (Кэ) в исследованных образцах закономерно снижается с глубиной. Для почв, сформированных на рыхлых почвообразующих породах, наблюдается резкое его снижение на глубине 30–40 см (от 11,7–10,8 до 5,6–5,8 – в черноземах Крыма; от 14,0 до 9,1 – в ростовских черноземах обыкновенных), где наиболее интенсивно происходят процессы выветривания, ограниченные глубиной промачивания почвы. Исключение составляет поведение по профилю Кэ чернозема южного Ростовской области, сформированного на двучленной породе: красно-бурой глине, подстилаемой элювием песчаника, более устойчивой к выветриванию, что, несомненно, сказывается на поведении кривой с глубиной (рис. 2). На поверхности Кэ равен 22,9, а на глубине 45–60 см – в 1,7 раза выше, достигает 38,3 и с глубиной практически не изменяется. Это свидетельствует о возрастании педогенного влияния оксидов кремния на процессы вторичного выветривания в почве, что, несомненно, обусловлено преобладанием вторичных глинистых минералов в материнской породе почвы [21]. Доказано, что с возрастом в почвах возрастает содержание кремния, так что совершенно закономерно, что Кэ в более зрелых почвах, достигших климаксного состояния, будет большим [5].

Особенности накопления и трансформации исходного материала в процессе почвообразования подтверждаются изменениями литохимического индекса CIA, так как он соответствует различной степени сохранности следов древнего почвообразования и выветривания. В невыветрелых породах значения CIA, как правило, низкие, а в сильно выветрелых климаксных почвах достигают 100 [21]. В почвах различного возраста индекс CIA естественным образом отражает интенсивность процессов почвообразования, поэтому логично предположить, что с увеличением возраста почв этот коэффициент будет увеличиваться. Так, для биоклиматических условий Крымского полуострова в почвах 100-летнего возраста значение CIA составляет 17,2; в 500-летних почвах его значение достигает 41,5, а в почвах 2000-летнего возраста – 60,5 [5].

В крымских почвах значение индекса CIA значительно ниже, чем в почвах Ростовской области (от 73,2–60,2 на поверхности предгорного чернозема и чернозема южного соответственно и до 20,2–49,2 на глубине 100 см). Невысокое значение CIA указывает на более молодой возраст почв Крымского полуострова и, как следствие, относительно более слабое развитие в них процессов почвообразования и выветривания [24].

В черноземе обыкновенном карбонатном в ростовском регионе значения CIA вглубь по профилю изменяются от 76,3 до 44,9. Южный чернозем в этом регионе с глубиной также отражает специфику обусловленности процесса почвообразования значительным вкладом материнской породы, так как с поверхности значения CIA равны 79,2, а вниз по профилю увеличиваются до 90,5. Столь высокие значения CIA в почвах, сформированных на территории Ростовской области, свидетельствуют, во-первых, о большей длительности проявления процессов выветривания вторичных минералов в процессе почвообразования; во-вторых, о том, что они более полно реализуют гидротермические ресурсы территории почвообразования.

Из графика изменения индекса CIA по профилю (рис. 3а) следует, что с глубиной наблюдается закономерное его снижение вследствие уменьшения темпов вторичного выветривания минералов, обусловленных ограниченностью энергетических характеристик среды, в которой происходят эти процессы. В первую очередь таким ограничивающим фактором выступает недостаточное количество влаги в весенне-летний период.

Аналогичным образом в исследуемых почвах меняется и литохимический индекс CIW (рис. 3б), который для удобства визуального отображения и формализованного выражения рассчитывали в редакции [5]: $CIW = ((Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + TiO_2) / Al_2O_3) \times 10$.

Уменьшение его значений указывает на увеличение количества собственно глинистых минералов по сравнению с почвообразующими породами, в которых высока доля неглинистых силикатных соединений, имеющих CIW более 10 [22]. В почвах, сформированных на территории Крымского полуострова, происходит увеличение по профилю значений CIW (от 10,9–9,38 в предгорных черноземах с поверхности до 43,5–17,1 на глубине около 100 см в черноземах южных), что свидетельствует об уменьшении с глубиной количества собственно глинистых минералов (рис. 3а, б). Особенно четко это выражено в профиле чернозема предгорного карбонатного, сформированного на элювии плотных карбонатных пород. В ростовском черноземе обыкновенном карбонатном, сформированном на лессовидном суглинке, аналогично вниз по профилю наблюдается увеличение индекса CIW, но его относительные значения ниже (9,2–19,2). Иными словами, с глубиной по профилю черноземов наблюдается замедление процессов выветривания.

В черноземе южном Ростовской области, сформированном на красно-бурой глине, также отмечается закономерное снижение величины CIW вниз по профилю (от 8,4 до 5,0), что, несомненно, обусловлено влиянием почвообразующей породы, снабжающей почву продуктами выветривания глин. Наиболее интенсивно эти процессы наблюдаются до глубины 45–55 см.

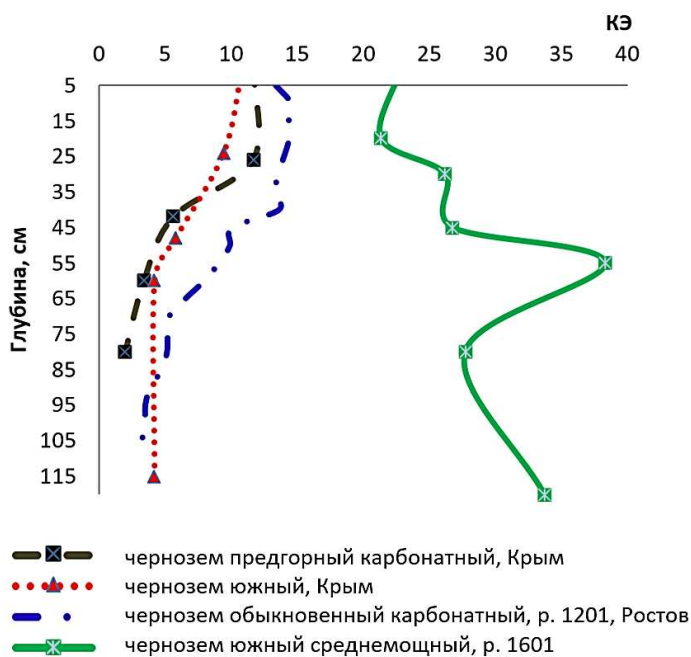


Рис. 2. Изменение коэффициента элювиирования по профилю черноземов / Fig. 2. Change of the coefficient of eluviation in the profile of chernozems

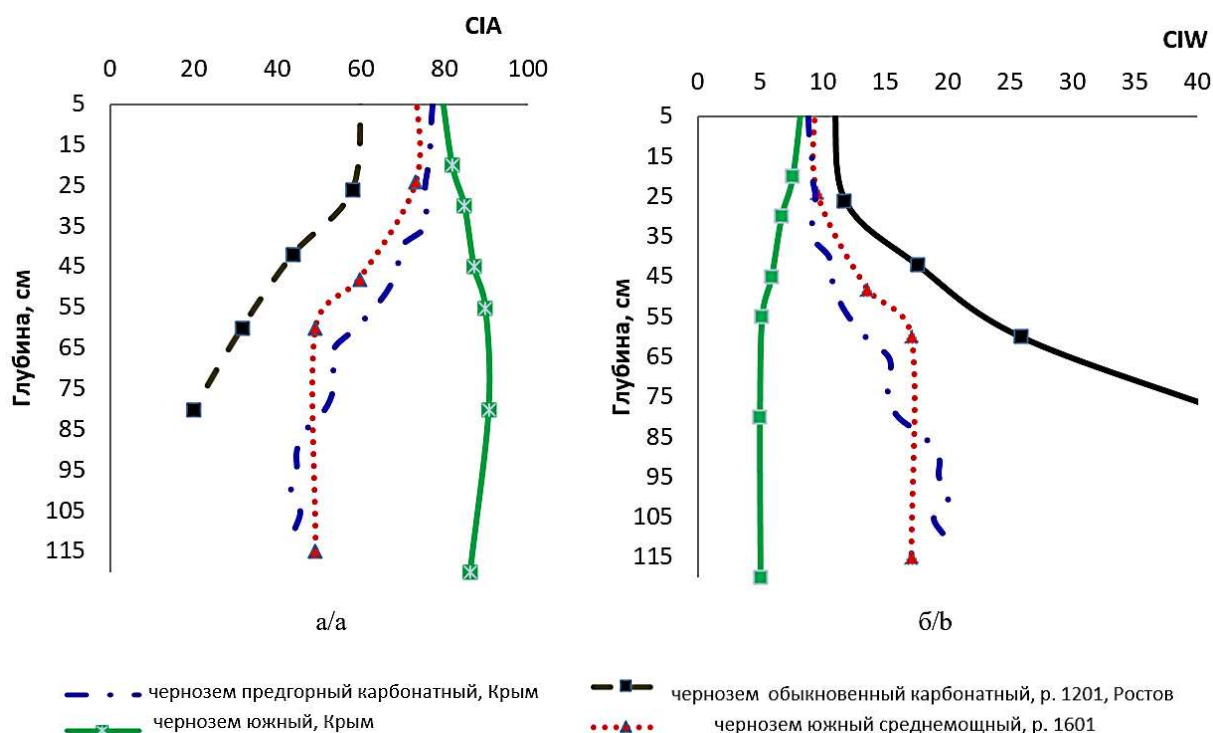


Рис. 3. Изменение по профилю черноземов: а – индекса выветривания CIA; б – индексов CIW / Fig. 3. Change along the profile chernozems: a – of the CIA weathering index; b – of the CIW indices

При анализе индексов CIW и CIA имеет смысл рассматривать закономерности распределения их по профилю, только в пределах глубины промачивания почвы. Маркером средней многолетней глубины промачивания является появление горизонта сегрегации карбонатов – горизонта скопления белоглазки [25]. С глубиной, за пределами промачиваемой толщи, интенсивность процессов почвообразования и выветривания в почвах описываемой территории заметно снижается.

Выводы

Литохимический анализ почв исследуемого региона показал, что на территории Крымского полуострова современные дневные почвы относительно более молодые по сравнению с полнопрофильными почвами Ростовской области. С глубиной интенсивность процессов почвообразования и выветривания в почвах региона заметно слабеет вследствие снижения темпов вторичного выветривания минералов, что обусловлено ограниченностью энергетических характеристик геосистемы. В первую очередь таким ограничивающим фактором является недостаточное количество влаги в весенне-летний период.

При изучении закономерностей динамики литохимических индексов зональных полноголоценовых почв, во-первых, отмечается целостность и непрерывность процесса почвообразования в голоцене; во-вторых, наблюдается на протяжении довольно длительного «характерного времени» синхронность процессов почвообразования и выветривания. Таким образом, использование литохимических индексов CIA и CIW представляется весьма информативным как для определения относительного возраста почв, так и для выявления региональной специфики процессов выветривания и почвообразования.

Список источников

1. Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука, 2005. 223 с.
2. Геннадиев А.Н. Почвы и время: модели развития. М.: МГУ, 1990. 232 с.
3. Демкин В.А., Ельцов М.В., Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Демкина Т.С., Борисов А.В. Развитие почв Нижнего Поволжья за историческое время // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1486–1497.
4. Герасименко Н.П. Зміни положення ландшафтних зон на території України у плейстоцені і голоцені // Український геогр. журн. 2004. № 3. С. 20–28.
5. Єрзіна О.І. Зміни геохімічних показників у процесі сучасного ґрунтоутворення в Криму // Віс. Львівського ун-ту. Серія геогр. 2013. Вип. 44. С. 114–122.
6. Иванов И.В. Проблемы эволюции почв (по итогам совещания в г. Пушино), 2002 // Почвоведение. 2002. № 10. С. 630–642.
7. Лисецкий Ф.Н., Ергина Е.И. Развитие почв Крымского полуострова в позднем голоцене // Почвоведение. 2010. № 6. С. 643–657.
8. Чендев Ю.Г., Тишков А.А., Савин И.Ю., Лебедева М.Г., Соловьев А.Б. Реакция почв и других компонентов природной среды на климатические изменения разной периодичности на юге Среднерусской возвышенности // Изв. РАН. Серия геогр. 2020. № 3. С. 427–440.
9. Carter J.C., Crawford M., Lehman P., Nikolaenko G., Trelogan J. The chora of Chersonesos in Crimea, Ukraine // American J. of Archaeology. 2000. Vol. 104, № 4. P. 707–741.
10. Cordova C. E., Lehman P. H. Holocene environmental change in Southwestern Crimea (Ukraine) in pollen and soil records // J. of Archaeological Science. 2003. Vol. 10. P. 1483–1501.
11. Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н., Розов Н.Н., Носин В.А., Фриев Т.А. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
12. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий / под ред. Е.А. Позаченюк. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 672 с.
13. Половицкий И.Я., Гусев П.Г. Почвы Крыма и повышение их плодородия. Симферополь: Таврия, 1987. 152 с.
14. Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: Доля, 2004. 208 с.
15. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
16. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов н/Д., 2006. 487 с.

17. Болдырева В.Э., Безуглова О.С., Морозов И.В., Меженков А.А., Литвинов Ю.А. Особенности гранулометрического состава черноземов обыкновенных карбонатных северного Приазовья // Живые и биокосные системы. 2022. № 39, Doi: 10.18522/2308-9709-2022-39-3. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-39/article-3/> (дата обращения: 01.12.2022).
18. Безуглова О.С., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 352 с.
19. Gallet S., Borming J., Masayuki T. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications // Chemical Geology. 1996. Vol. 133. P. 67–88.
20. Liu G., Li L., Wu L., Wang G., Zhou Zh., Shuhan D. Determination of soil loss tolerance of an entisol in Southwest China // Soil Sci. Soc. Am. J. 2009. Vol. 73, № 2. P. 412–417.
21. Елизарова Т.Н., Дитц Л.Ю., Сысо А.И., Смоленцев В.А., Чичулин А.В., Зыбина Т.В. Современные и реликтовые свойства лесостепных ландшафтов Западной Сибири // Сиб. экол. журн. 2005. № 5. С. 871–887.
22. Калинин П.И., Алексеев А.О. Геохимические характеристики погребенных голоценовых почв степей Приволжской возвышенности // Вестн. ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2008. № 1. С. 9–15.
23. Шоба С.А., Герасимова М.И., Таргульян В.О., Урусевская И.С., Алябина И.О., Макеев А.О. Почвообразующий потенциал природных факторов // Генезис, география и экология почв : сб. науч. тр. Междунар. конф. Львов, 1999. С. 90–92.
24. Ергина Е.И. Пространственно-временные закономерности процессов современного почвообразования на Крымском полуострове. Симферополь: Ариал, 2017. 220 с.
25. Минаева Е.Н., Безуглова О.С., Морозов И.В. Влияние многолетней динамики атмосферных осадков на генезис степных и сухостепных почв // Наука Юга России. 2021. Т. 17, № 1. С. 52–62.

References

1. Alexandrovsky A.L., Alexandrovskaya E.I. *Evolution soils and geographical environment*. Moscow: Nauka Publ.; 2005. 223 p. (In Russ.).
2. Gennadiev A.N. *Soils and time: models of development*. Moscow: Moscow State University Press; 1990. 232 p. (In Russ.).
3. Demkin V.A., Eltsov M.V., Alekseev A.O., Alekseeva T.V., Demkina T.S., Borisov A.V. Soil development in the Lower Volga region over historical time. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2004;(12):1486-1497. (In Russ.).
4. Gerasimenko N.P. Changes in the position of landscape zones on the territory of Ukraine in the Pleistocene and Holocene. *Ukrainian Geographical Journal*. 2004;(3):20-28. (In Ukrainian).
5. Ergina E.I. Changes in geochemical indications of the process of daily soil creation in Crimea. *Bulletin of Lviv University. The series geographical*. 2013;44:114-122. (In Ukrainian).
6. Ivanov I.V. Problems of evolution of soils (on the results of the meeting in Pushchino), 2002. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2002;(10):630-642. (In Russ.).
7. Lisetsky F.N., Ergina E.I. Development of soils of the Crimean Peninsula in the late Holocene. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2010;(6):643-657. (In Russ.).
8. Chendev Yu.G., Tishkov A.A., Savin I.Yu., Lebedeva M.G., Solovyov A.B. Reaction of soils and other components of the natural environment to climatic changes of different periodicity in the south of the Central Russian Upland. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2020;(3):427-440. (In Russ.).
9. Carter J.C., Crawford M., Lehman P., Nikolaenko G., Trelogan J. The chora of Chersonesos in Crimea, Ukraine. *American J. of Archaeology*. 2000;104(4):707-741.
10. Cordova C.E., Lehman P.H. Holocene environmental change in southwestern Crimea (Ukraine) in pollen and soil records. *Journal of Archaeological Science*. 2003;10:1483-1501.
11. Egorov V.V., Fridland V.M., Ivanova E.N., Rozov N.N., Nosin V.A., Friev T.A. *Classification and diagnostics of soils of the USSR*. Moscow: Kolos Publ.; 1977. 223 p. (In Russ.).
12. Pozachenyuk E.A., ed. *Modern landscapes of the Crimea and adjacent water areas*. Simferopol: Biznes-Inform Publ.; 2009. 672 p. (In Russ.).
13. Polovitsky I.Ya., Gusev P. G. *Soils of the Crimea and increasing their fertility*. Simferopol: Tavriya Publ.; 1987. 152 p. (In Russ.).
14. Dragan N.A. *Soil resources of the Crimea*. Simferopol: Dolya Publ.; 2004. 208 p. (In Russ.).
15. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnostics of Russian soils*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).
16. Panov V. D., Lurie P. M., Larionov Yu. A. *Climate of the Rostov region: yesterday, today, tomorrow*. Rostov-on-Don, 2006. 487 p. (In Russ.).
17. Boldyreva V.E., Bezuglova O.S., Morozov I.V., Mezhenkov A.A., Litvinov Yu.A. Features of the grain size distribution of ordinary carbonate chernozems of the Northern Azov region. *Zhivye i biokosnye sistemy = Live*

and Bio-Abiotic Systems. 2022;(39). Doi: 10.18522/2308-9709-2022-39-3 [Accessed 1st December 2022]. Available from: <https://jbks.ru/archive/issue-39/article-3/> (In Russ.).

18. Bezuglova O.S., Khyrkhyrova M.M. *Soils of the Rostov region*. Tutorial. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 352 p. (In Russ.).

19. Gallet S., Borming J., Masayuki T. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. *Chemical Geology*. 1996;133:67-88.

20. Liu G., Li L., Wu L., Wang G., Zhou Zh., Shuhan D. Determination of soil loss tolerance of an entisol in Southwest China. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2009;73(2):412-417.

21. Elizarova T.N., Ditz L.Yu., Syso A.I., Smolentsev V.A., Chichulin A.V., Zybina T.V. Modern and relict properties of forest-steppe landscapes of Western Siberia. *Sib. ekol. zhurn. = Contemporary Problems of Ecology*. 2005;(5):871-887.

22. Kalinin P.I., Alekseev A.O. Geochemical characteristics of buried Holocene soils of the steppes of the Volga Upland. *Vestn. VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2008;(1):9-15. (In Russ.).

23. Shoba S.A., Gerasimova M.I., Targulian V.O., Urusevsky I.S., Alyabin I.O., Makeev A.O. The soil-forming potential of natural factors. *Genesis, geography and ecology of soil*. Collection of Scientific Papers of the International Conference. Lviv, 1999:90-92. (In Russ.).

24. Ergina E.I. *Spatial and temporal regularities of modern soil formation processes on the Crimean peninsula*. Simferopol: Arial Publ.; 2017. 220 p. (In Russ.).

25. Minaeva E.N., Bezuglova O.S., Morozov I.V. Influence of long-term dynamics of atmospheric precipitation on the genesis of steppe and dry steppe soils. *Nauka Yuga Rossii = Science in the South Russia*. 2021;17(1):52-62, doi: 10.7868/S25000640210105. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.И. Ергина – доктор географических наук, профессор, кафедра физической, социально-экономической географии, ландшафтоведения и геоморфологии.

О.С. Безуглова – доктор биологических наук, профессор, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Information about the authors

E.I. Ergina - Doctor of Science (Geography), Professor, Department of Physical, Social and Economic Geography, Landscape Science and Geomorphology.

O.S. Bezuglova - Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Soil Science and Land Resources Assessment.

*Статья поступила в редакцию 02.12.2022; одобрена после рецензирования 26.12.2022; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 02.12.2022; approved after reviewing 26.12.2022; accepted for publication 19.05.2023.*

Научная статья

УДК 551.582.2

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-75-80

АНАЛИЗ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ИРАКА

Александр Рувимович Иошпа^{1✉}, **Имад Абдулриза Джасим Аль-Хулайфави**²

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

¹aioshp@sfedu.ru✉

²imadjasim900@gmail.com

Аннотация. Систематический мониторинг повторяемости гроз над различными регионами мира начал осуществляться с 1856 г., после создания Всемирной метеорологической организации. Анализ накопленных данных показал, что повторяемость гроз существенно зависит как от географического положения местности, так и от времени года.

Вместе с тем закономерности пространственного распределения тенденций межгодовой изменчивости грозовой активности над территорией Ирака изучены недостаточно. В статье проведен анализ грозовой активности по архивным данным ежедневных метеорологических наблюдений за 30-летний период на трех метеорологических станциях, расположенных в различных климатических зонах Ирака. Анализ показал, что наибольшая повторяемость гроз приходится на март и апрель, из них 44,8 % – на северную горную часть Ирака.

Ключевые слова: гроза, Ирак, конвективная облачность, грозовая активность, дефицит осадков

Для цитирования: Иошпа А.Р., Аль-Хулайфави И.А.Д. Анализ грозовой активности на территории Ирака // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 75–80.

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

Original article

ANALYSIS OF THUNDERSTORM ACTIVITY IN IRAQ

Alexandr R. Ioshpa^{1✉}, **Imad Abdulridha Jasim Al-Khulaifawi**²

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

¹aioshp@sfedu.ru✉

²imadjasim900@gmail.com

Abstract. Systematic monitoring of the recurrence of thunderstorms over various regions of the world began in 1856, after the creation of the World Meteorological Organization. Analysis of the accumulated data showed that the frequency of thunderstorms over different regions of the world depends significantly both on their geographical location and on time.

At the same time, the patterns of spatial distribution of trends in interannual variability of thunderstorm activity over the territory of Iraq are currently not well understood. This study analyzed thunderstorm activity from archival data from daily meteorological observations over a 30-year period at three meteorological stations located in different climatic zones of Iraq. The analysis showed that the greatest frequency of thunderstorms occurs in April and March, of which the months of March are higher. 44.8 % is in the northern mountainous part of Iraq.

Keywords: thunderstorm, Iraq, convective cloudiness, thunderstorm activity, precipitation deficit

For citation: Ioshpa A.R., Al-Khulaifawi I.A.J. Analysis of Thunderstorm Activity in Iraq. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):75-80. (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

Одной из главных климатических задач Ирака является адаптация к растущей изменчивости климата страны, особенно с точки зрения водоснабжения. Так, за двумя годами сильной засухи (с 2007 по 2009 г.) последовали несколько месяцев внезапных сильных дождей и штормов, в течение которых в некоторых частях центрального и южного Ирака выпало около 200 % осадков [1, 2].

Интенсивные осадки на территории Ирака в основном выпадают из конвективной облачности в виде ливней и связаны с прохождением фронтальных разделов. Развитие конвективной облачности сопровождается не только сильными ливнями и шквалистыми ветрами, но также градом и грозами. Все это приводит порой к катастрофическим последствиям.

Грозы – одно из сложнейших атмосферных явлений. Согласно официальной статистике, грозы и молнии представляют большую природную опасность для авиации, занимают второе место среди природных факторов, угрожающих жизни человека, наносят значительный ущерб различным отраслям экономики и влияют на динамику экосистем. Поэтому прогнозирование гроз – актуальная и достаточно сложная задача не только метеорологии, но и смежных наук. Особенности распространения гроз и их прогнозирование изучались не одним поколением исследователей [3–9]. Они использовали различные методы, в том числе синоптические, климатические и численное моделирование. Однако интерес к этой проблеме не исчезает, так как на фоне климатических изменений происходит увеличение случаев опасных природных явлений, включая грозовую активность. Известно, что гроза связана с наличием сильной неустойчивости стратификации воздуха при высоком влагосодержании. Общий фон для возникновения и развития грозы на достаточно больших территориях создают макропроцессы, определяющие пути перемещения циклонов, в которых в основном и формируются условия, благоприятные для возникновения грозы. Однако в каждом конкретном районе эти условия реализуются по-разному, в зависимости от характеристик конкретной территории [10].

Материалы и методы исследований

Географическое расположение Ирака довольно своеобразно: различные типы местности, горные районы на севере и северо-востоке Ирака, холмистые – к югу от горных, аллювиальные равнины и западные плато. Расположение этих районов в зависимости от высоты над уровнем моря играет важную роль в формировании различных климатических условий в разных регионах. По направлению с юга на север температура падает и увеличивается количество дождей [11].

На юге Ирака увлажняющее влияние на климат оказывают Средиземное и Красное моря, Персидский залив и аллювиальные марши. Существуют три климатические зоны: средиземноморская на севере Ирака, полупустынная в холмистом регионе и районе Эль-Джазира и пустынная на западном плато и большей части аллювиальных равнин [11].

Своеобразный климат Ирака обусловлен его положением в месте встречи средиземноморских и континентальных воздушных масс. Барьерный эффект гор создаёт условия для формирования конвективной облачности в течение года.

Цель работы – выявление особенностей пространственного распределения тенденций межгодовой изменчивости грозовой активности над территорией Ирака.

Исследование проводилось на основе анализа ежедневных (архивных) метеорологических данных о грозовых явлениях за 30 лет (1990–2019 гг.) на трех метеорологических станциях (Ханакин, аэропорты Багдад и Басра). Эти станции были репрезентативны для всех географических регионов страны (рис. 1). Ряды данных проверены на предмет их качества и непрерывности записей. Осуществлен экспертный контроль. Недостатком является тот факт, что доступные ряды данных очень короткие и в некоторых из них были пропуски наблюдений.

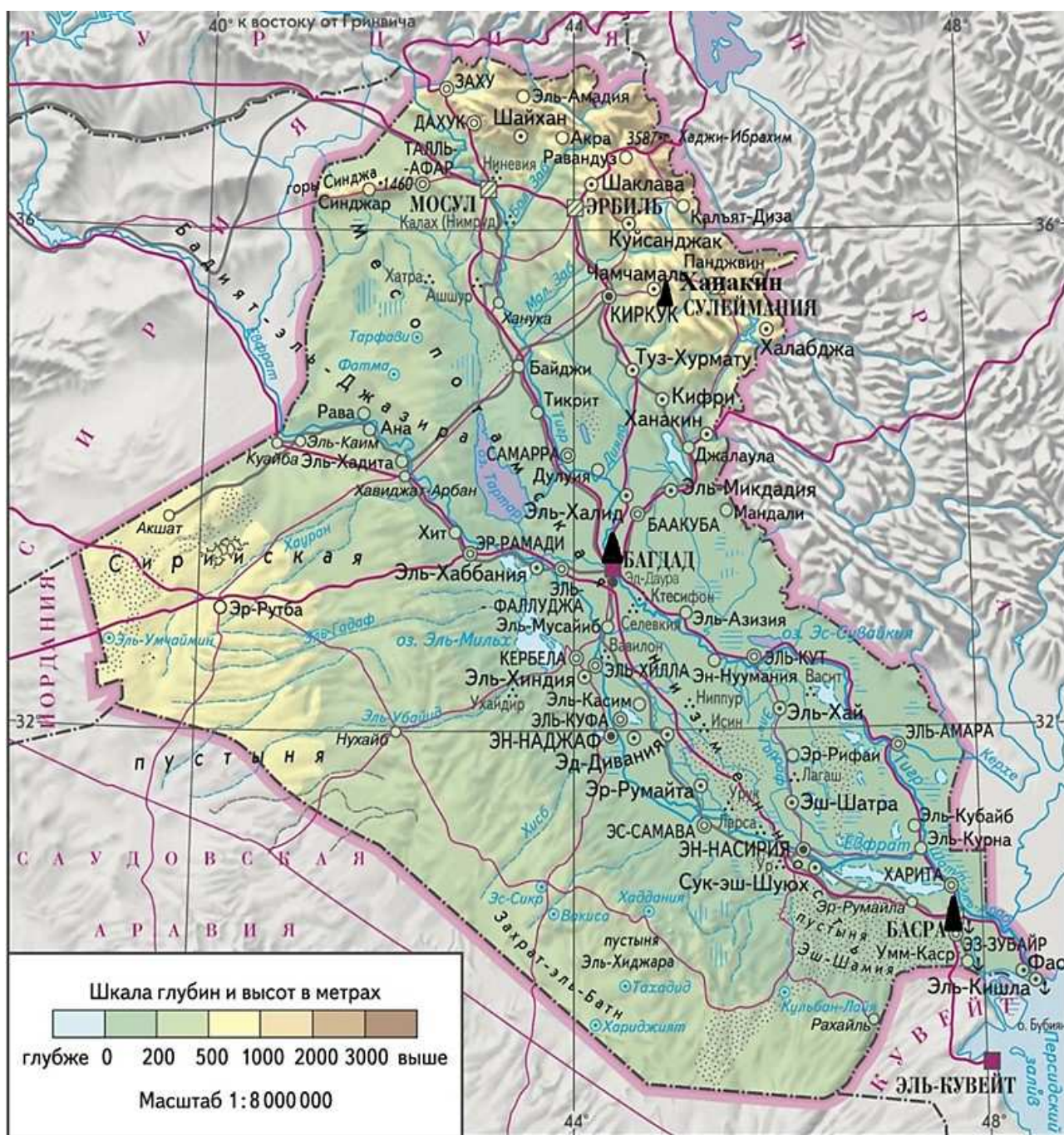


Рис. 1. Метеорологические станции, используемые в исследовании / Fig. 1. Meteorological stations used in the study

На всех трех метеорологических станциях были проанализированы случаи с грозами. В качестве базового показателя грозовой активности принят день с грозой. Для его определения фиксировались сутки, метеостанция и интервал местного времени с 00:00 до 24:00 часов по местному времени; по срокам наблюдений 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00. Если гроза была в ночное время в период перехода суток, она включалась в оба дня.

Полученные результаты были статистически обработаны, сформированы в таблицы и включали в себя ежедневное, ежемесячное и годовое количество дней с грозами на каждой станции.

Краткий статистический анализ был применен для оценки изменчивости и возможных различий в среднем числе дней хотя бы с одним грозовым событием из долгосрочных рядов данных в каждом регионе. Статистическая значимость их изменений была рассчитана тестом Манна – Кендалла для всего периода 1990–2019 гг. [12].

Результаты исследований и их обсуждение

Временная изменчивость суммарного числа дней с грозами на территории Ирака по трем метеостанциям представлена на рис. 2 за 30-летний период. Результаты анализа показывают, что наибольшее количество дней с грозами за рассматриваемый период приходится на горные районы, где расположена станция Ханакин (230); наименьшая повторяемость наблюдалась в районе Арабского (Персидского) залива на метеостанции Басра (120).

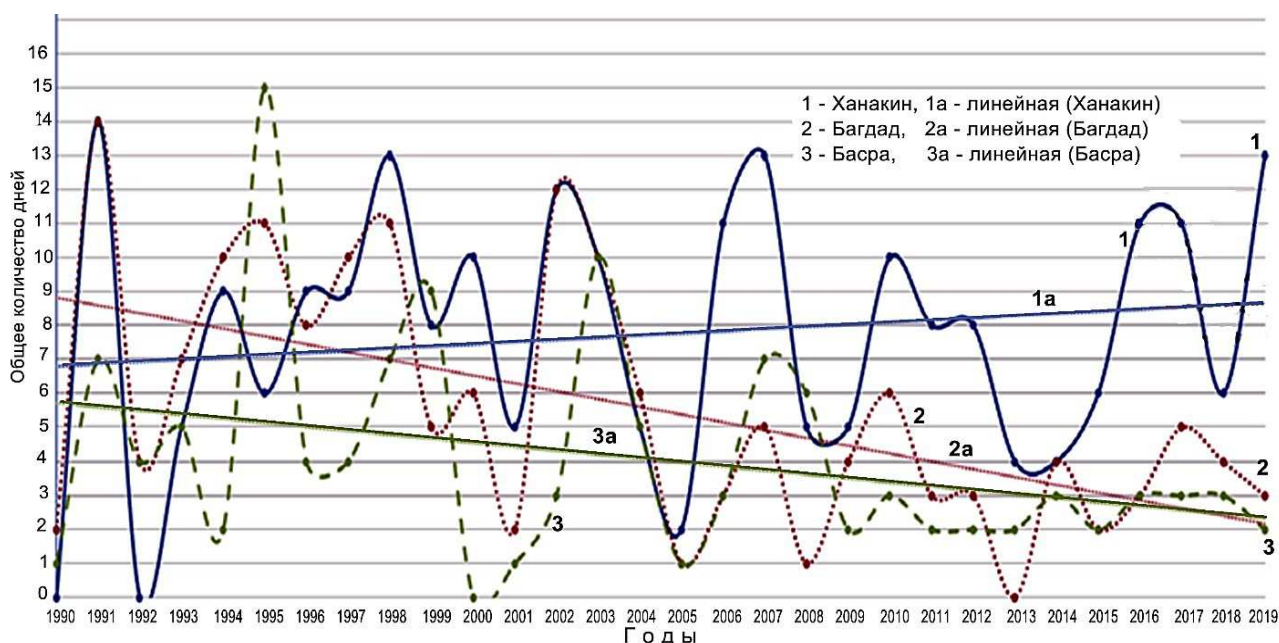


Рис. 2. Распределение суммарного числа случаев гроз по годам за 30-летний период
/ Fig. 2. Distribution of the total number of thunderstorm cases by year over a 30-year period

За исследуемый период увеличение количества дней с грозами отчетливо наблюдается в районе станции Ханакин, на остальной территории (равнинной части) Ирака – уменьшение. Хотя, как видно из рис. 2, с 1990 по 2000 г. на всей территории наблюдался практически одинаковый положительный тренд. С конца 2000 г. значительно уменьшилось количество дней с грозами, которые сопровождалось выпадением ливневых осадков в теплый период года по данным фактических наблюдений на станциях Багдад и Басра. Естественно, уменьшение повторяемости гроз в равнинных районах страны приводит и к сокращению повторяемости ливневых осадков. Отсутствие летних дождей и сопутствующее повышение температуры увеличивают процесс испарения. Кроме того, по данным [1], в последние годы наблюдаются острый дефицит осадков и очень высокая температура, достигающая 50 °С. Всё это значительно повлияло на расширение опустынивания в Ираке.

Анализ среднемесячного числа дней с грозами за 10-летний период (2010–2019 гг.) на всех станциях показал, что обычно около 52,8 % всех гроз приходилось на март – май (рис. 3).

Максимальная грозовая активность наблюдается в апреле, количество дней с грозами увеличивалось в северной и северо-западной частях страны, в горной местности, из-за преобладающих орографических условий, способствующих конвекции.

В летний период на всей территории Ирака гроз не наблюдалось, а в сентябре они крайне редки (в среднем 1–2 случая за пятилетие). Это связано с высокими температурами воздуха на всей территории государства и высокой испаряемостью. По данным из [13], средняя максимальная температура воздуха достигает более +40 °С в течение четырех месяцев теплого периода года (июнь – сентябрь).

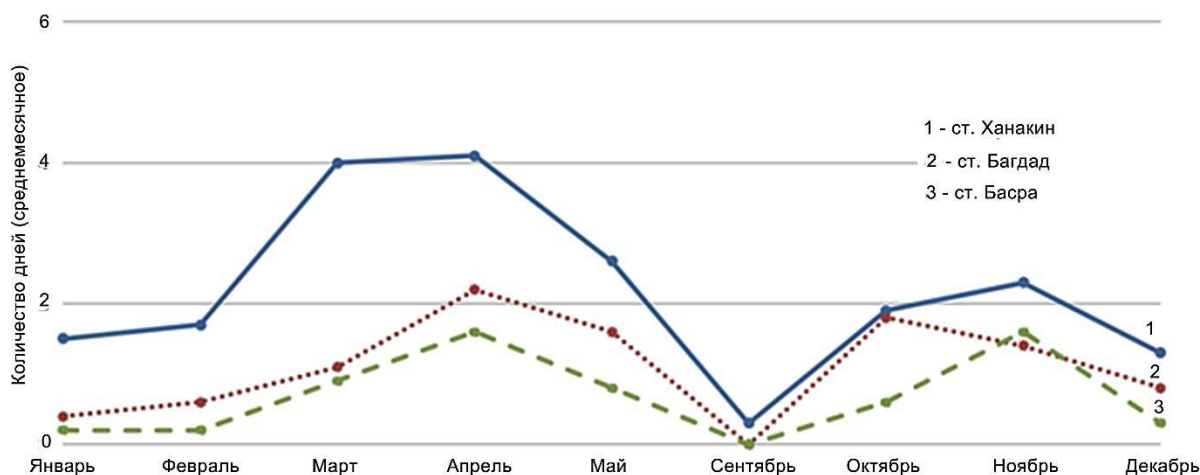


Рис. 3. Среднемесячное число дней с грозой за период с 2010 по 2019 г.

/ Fig. 3. Average monthly number of days with thunderstorms for the period from 2010 to 2019

На основе проведенного анализа повторяемости гроз на исследуемой территории можно сделать заключение, что в северной и северо-восточной частях Ирака отмечается высокий уровень грозовой активности. Наибольшая повторяемость гроз в годовом ходе приходится на март, апрель. За исследуемый период наблюдается увеличение числа дней с грозой на метеорологической станции Ханакин, достигшего к концу исследуемого периода 13 дней за год. Сухие грозы, отмечающиеся в теплый период года, часто приводят к возникновению пыльных и песчаных бурь.

Список источников

1. Альдеражи Башир Мазен Шехаб, Аль-Дулейми Хамид Дахил Айад. Динамика выпадения дождевых осадков на территории Ирака // Вестн. ВДПУ. Серия 3. 2015. № 1. С. 58–63.
2. Султан А.Г. Климат, его элементы и изменения. Багдад: Багдад, 1986. 480 с. (на араб. языке).
3. Аль-Алуси Д.Ц. Элементы климата и их явления в Ираке. Багдад, 2009. 173 с. (на араб. языке).
4. Бирман Б.А., Бережная Т.В. Основные погодно-климатические особенности Северного полушария Земли, 2012 г.: аналит. обзор. М., 2013. 60 с.
5. Губенко И.М. Исследование физических процессов в конвективных облаках во время гроз на основе численного моделирования: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2016. 130 с.
6. Имянитов И.М., Кулик М.М., Чуваев А.П. Опыт исследования грозовых облаков в южных районах Европейской территории СССР и в Закавказье // Тр. ГГО. 1957. Вып. 67. С. 3–32.
7. Переведенцев Ю.П., Аль-Маамури С.К., Шанталинский К.М., Аухадеев Т.Р. Пространственно-временные изменения климатических характеристик на территории Ирака в период 1979–2016 гг. // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 145–157.
8. Переведенцев Ю.П. Термобарический режим Ирака за период 1948–2013 гг. // Уч. зап. Казанского ун-та. Естественные науки. 2016. Т. 158, кн. 1. С. 148–159.
9. Петросянц М.А., Семенов Е.К., Гущина Д.Ю., Соколичина Е.В., Соколичина Н.Н. Циркуляция атмосферы в тропиках: климат и изменчивость. М.: Макс Пресс, 2005. 160 с.
10. Горбатенко В.П. Синоптические условия образования и развития гроз над территориями Западной Сибири и Казахстана // Вестн. Томского ун-та. 2001. Вып. 272. С. 220–223.
11. Авад Висам Раджи Наджи. Динамика изменения ландшафтов в условиях опустынивания сельскохозяйственных земель (на примере юга Ирака): дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2019. 140 с.
12. Robaa S.M., Al-Barazanji Z.J. Mann-Kendall trend analysis of surface air temperatures and rainfall in Iraq // Quarterly J. of Hungarian Meteorological Service. 2015. Vol. 119, № 4. P. 493–514.
13. Хусейни К.Ф. Показатели изменения климата и воздействия на окружающую среду в Ираке. Багдад, 2012. 274 с. (на араб. языке).

References

1. Alderazhi Bashir Mazen Shehab, Al-Duleimi Hamid Dahil Ayad. Dynamics of rainfall on the territory of Iraq. Vestn. VDP. Seriya 3 = Bulletin of the Belarusian Pedagogical State University. Series 3. 2015;(1):58-63. (In Russ.).

2. Sultan A. G. *Climate, its elements and changes*. Baghdad: Baghdad Publ.; 1986. 480 p. (In Arabic).
3. Al-Alusi D.C. *Climate elements and their phenomena in Iraq*. Baghdad, 2009. 173 p. (In Arabic).
4. Birman B.A., Berezhnaya T.V. *The main weather and climatic features of the Northern Hemisphere of the Earth, 2012*. Analytical review. Moscow, 2013. 60 p. (In Russ.).
5. Gubenko I.M. *Investigation of physical processes in convective clouds during thunderstorms based on numerical simulation*. Dissertation Thesis. Moscow, 2016. 130 p. (In Russ.).
6. Imyanitov I.M., Kulik M.M., Chuvaev A.P. Experience in the study of storm clouds in the southern regions of the European territory of the USSR and in Transcaucasia. *Trudy GGO = Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*. 1957;(67):3-32. (In Russ.).
7. Perevedentsev Yu.P., Al-Maamuri S.K., Shantalinsky K.M., Aukhadeev T.R. Spatio-temporal changes in climatic characteristics on the territory of Iraq in the period 1979-2016. *Trudy Gidromettsentra Rossii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2017;(366):145-157. (In Russ.).
8. Perevedentsev Yu.P. Thermobaric regime of Iraq for the period 1948-2013. *Uch. zap. Kazanskogo un-ta. Estestvennye nauki = Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*. 2016;158(1):148-159. (In Russ.).
9. Petrosyants M.A., Semenov E.K., Gushchina D.Yu., Sokolikhina E.V., Sokolikhina N.N. *Atmospheric circulation in the tropics: climate and variability*. Moscow: Maks Press; 2005. 160 p. (In Russ.).
10. Gorbatenko V.P. Synoptic conditions of formation and development of thunderstorms over the territories of Western Siberia and Kazakhstan. *Vestnik Tomskogo universiteta = Tomsk State University Journal*. 2001;(272):220-223. (In Russ.).
11. Awad Wisam Raji Naji. *Landscape dynamics in the desertification of agricultural land (exemplified by southern Iraq)*. Dissertation Thesis. Saint Petersburg, 2019. 140 p. (In Russ.).
12. Robaa S.M., Barazanji Z.J. Mann-Kendall trend analysis of surface air temperatures and rainfall in Iraq. *Quarterly Journal of Hungarian Meteorological Service*. 2015;119(4):493-514.
13. Husseini K. F. *Indicators of climate change and environmental impact in Iraq*. Baghdad, 2012. 274 p. (in Arabic).

Информация об авторах

*А.Р. Йошпа – кандидат географических наук, доцент, кафедра океанологии, Институт наук о Земле.
И.А.Д. Аль-Хулайфави – аспирант, Институт радиотехнических систем и управления.*

Information about the authors

A.R. Iosha - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Oceanology, Institute of Earth Sciences.

I.A.J. Al-Khulafawi - Postgraduate Student, Institute of Radio Engineering Systems and Control.

*Статья поступила в редакцию 05.12.2022; одобрена после рецензирования 29.12.2022; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 05.12.2022; approved after reviewing 29.12.2022; accepted for publication 15.05.2023.*

Научная статья
УДК 551.435.3, 528.8
doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-81-89

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО СТРОЕНИЯ ПОДВОДНОЙ АККУМУЛЯТИВНОЙ ФОРМЫ БАНКА ЕЛЕНИНА

Вячеслав Владимирович Крыленко^{1✉}, Марина Владимировна Крыленко²

^{1, 2} Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

¹krylenko.slava@gmail.com ✉

²krylenko@mail.ru

Аннотация. Банка Еленина – подводная аккумулятивная форма в восточной части Азовского моря. Она сформировалась 2,5–1,7 тыс. лет назад в период фанагорийской регрессии, в ходе последующего повышения уровня моря банка Еленина оказалась под водой. Анализ современного строения банки Еленина выполнен с использованием литературных источников и данных дистанционного зондирования. Цифровые модели подводного рельефа для банки Еленина были построены на основе космических снимков Sentinel-2 по методике взаимной корреляции яркости каналов спектра и глубины. Длина банки – около 40 км, ширина – до 5 км, минимальные глубины – 1,5–2 м. У западной оконечности банки обнаружены дуговидные гряды длиной до 6 км. В настоящее время банка Еленина является активной аккумулятивной формой и оказывает влияние на литодинамический режим прилегающей части Азовского моря. Поперечный профиль банки указывает на преобладающее направление движения наносов – с юга на север. Банка Еленина аккумулирует большую часть донных наносов, переносимых на С-СВ, но выдвигание края аккумулятивного тела на север практически отсутствует из-за резкого свала глубин. Наличие аккумулятивного тела банки Еленина способствует формированию к северу от нее сильных и устойчивых по направлению течений.

Ключевые слова: Азовское море, аккумулятивная форма, подводный рельеф, дистанционные методы

Благодарности: использованы сведения о развитии берегов Азовского моря, гидрологических и гидролитодинамических особенностях, полученные при выполнении темы госзадания № FMWE-2021-0013. Помощь в получении и обработке данных дистанционного зондирования оказал SCANEX R&D Centre (Россия).

Для цитирования: Крыленко В.В., Крыленко М.В. Особенности современного строения подводной аккумулятивной формы банка Еленина // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 81–89.

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

Original article

FEATURES OF THE MODERN STRUCTURE OF THE UNDERWATER ACCUMULATIVE FORM OF THE ELENINA BANK

Viacheslav V. Krylenko^{1✉}, Marina V. Krylenko²

^{1, 2} Shirshov Institute of Oceanology RAS (Southern Branch), Moscow, Russia

¹krylenko.slava@gmail.com ✉

²krylenko@mail.ru

Abstract. The Elenina Bank is an underwater accumulative form of the eastern part of the Sea of Azov. It was formed 2.5-1.7 thousand years ago during the Phanagorian regression. During the subsequent sea level rise the Elenina Bank was under water. The analysis of the modern structure of the Elenina Bank was carried out using literary sources and remote sensing data. Digital models of the underwater relief for the Elenina Bank were built

© Крыленко В.В., Крыленко М.В., 2023

on the basis of Sentinel-2 satellite images using the method of mutual correlation of the brightness of the spectrum channels and depth. The length of the Elenina Bank is about 40 km, the width is up to 5 km, the minimum depth of the water area is 1.5-2 m. Arc-shaped ridges up to 6 km long were found at the western tip of the bank. Currently, the Elenina Bank is active accumulative form and influences the lithodynamic regime of the adjacent part of the Sea of Azov. The transverse profile of the bank indicates the predominant direction of sediment movement – from S to N. The Elenina Bank accumulates most of the sediments transferred to the S-SE, but there is practically no extension of the edge of the accumulative body to the North due to a sharp drop in depths. The presence of the accumulative body of the Elenina Bank contributes to the formation of strong and stable currents to the North of it.

Keywords: Sea of Azov, accumulative form, underwater relief, remote sensing

Acknowledgments: Information on the development of the coasts of the Sea of Azov, hydrological and hydro-lithodynamic features obtained during the implementation of the topic of State Assignment No. FMWE-2021-0013 was used. Assistance in obtaining and processing remote sensing data was provided by SCANEX R&D Center (Russia).

For citation: Krylenko V.V., Krylenko M.V. Features of the Modern Structure of the Underwater Accumulative Form of the Elenina Bank. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):81-89. (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

Банка Еленина – это крупная реликтовая подводная аккумулятивная форма, расположенная в восточной части Азовского моря (рис. 1). В отличие от расположенной рядом косы Долгой (рис. 1), являющейся объектом многих научных исследований, банка Еленина в большинстве случаев рассматривается лишь как унаследованный элемент рельефа, не играющий значительной роли в развитии современных литодинамических процессов. Однако есть основания полагать, что банка Еленина оказала и продолжает оказывать непосредственное влияние на литодинамику косы Долгой, а также во многом определяет гидролитодинамический режим прилегающей части Азовского моря. Цель представленного исследования – на основе литературных источников и данных дистанционного зондирования проанализировать строение банки Еленина и оценить влияние, которое данная форма рельефа продолжает оказывать на развитие косы Долгой и гидрологический режим Азовского моря.

Первое графическое изображение и промеры глубин отмелей банки Еленина имеются на карте Азовского моря П. Бергмана 1701 г. В 1702 г. этим же автором была издана детальная карта Таганрогского залива, с высокой достоверностью передающая очертания берегов, в том числе аккумулятивных форм, с указанием измеренных глубин. В основу перечисленных карт были положены промеры глубин, выполненные в ходе Азовских походов царя Петра I [1].

В последующее столетие гидрографические работы в этой части Азовского моря не велись. В работе [2] указано, что «новая банка Елена» описана К.Л. Влито в 1803 г., после того как на ней в 1801 г. на мели стояло военное судно «Елена», по имени которого банка получила свое название. В данной работе [2] приведены сведения по конфигурации и размерам банки. Банка начинается в 0,93 км к югу от мыса Обрыв, ориентирована на ЗЮЗ. Длина банки 31,75 км. Глубины к ЮВ от оси банки меньше, чем к СЗ (т.е. поперечный профиль несимметричен). Непосредственно на банке грунт состоит из «крупного песку и красноватых мелких ракушек», к западу от банки грунт илистый.

В изданном полвека спустя описании Азовского моря [3] приведены новые данные по банке Еленина (сокращенно): «Южнее косы Долгой протягивается от мыса Обрыв к WSW на 27,78 км отмель. Отмель Еленина тянется языком от 0,93 до 3,7 км шириною. В 7,4 км от берега на ней глубина 5 футов; в 16,7 км – 9 футов; в 22,2 км – 12 футов, и в 27,8 км – 10 футов. Грунт везде крупный песок с мелкою красноватою ракушкою». Документ иллюстрирован картой из атласа Е.П. Манганари [1], фрагмент которой приведен на рис. 2. Видно, что очертания подводных форм рельефа в целом соответствуют современным.

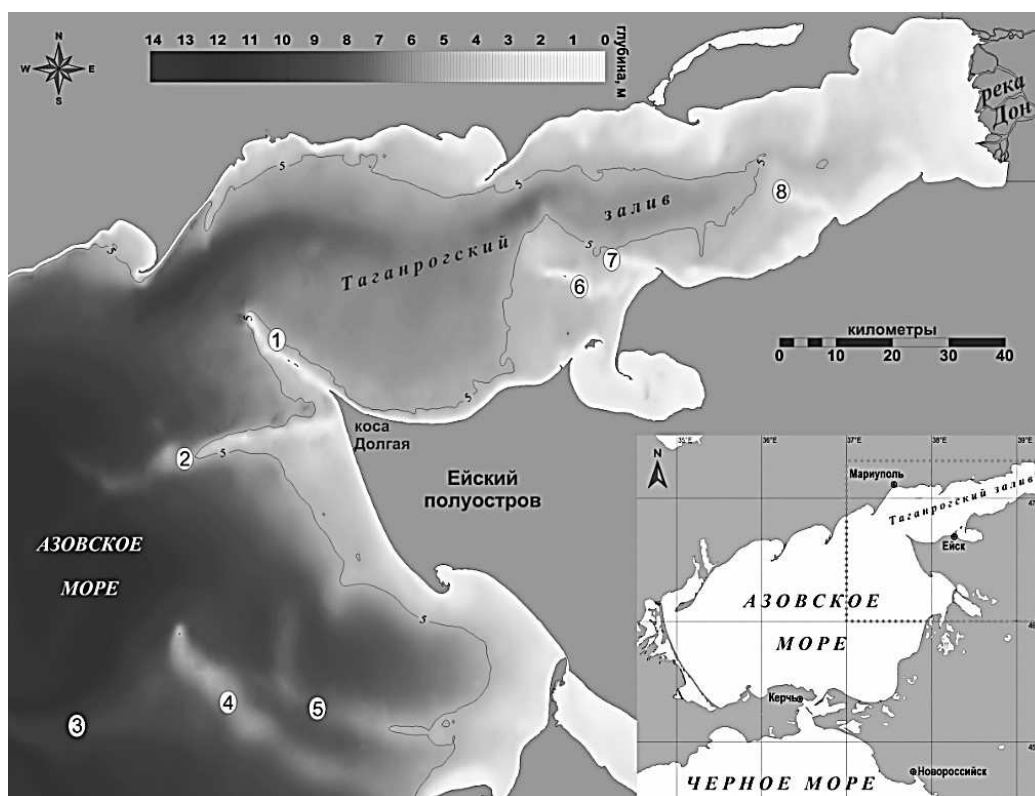


Рис. 1. Рельеф дна и подводные аккумулятивные формы восточной части Азовского моря: банки: 1 – Долгая; 2 – Еленина; 3 – Ачуйевская; 4 – Железинская; 5 – Ахтарская; 6 – Песчаных островов; 7 – Сазальницкая; 8 – Чумбурская / Fig. 1. Bottom relief and underwater accumulative forms of the Eastern part of the Sea of Azov: banks: 1 - Dolgaya; 2 - Elenina; 3 - Achuyevskaya; 4 - Zhelezinskaya; 5 - Akhtarskaya; 6 - Sandy Islands; 7 - Sazalnitskaya; 8 - Chumburskaya

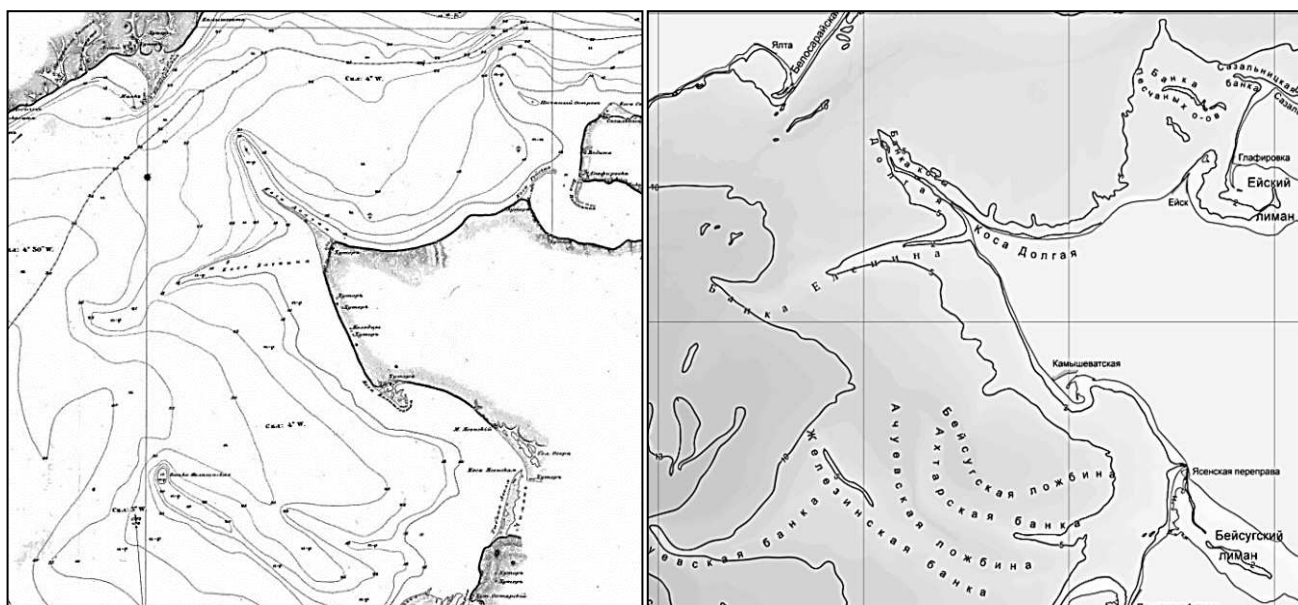


Рис. 2. Банка Еленина и коса Долгая. Слева – фрагмент карты Азовского моря Е.П. Манганари (1833 г.) [1]; справа – современная батиметрическая карта [4] / Fig. 2. The Elenina Bank and the Dolgaya Spit. On the left – a fragment of the map of the Sea of Azov by E.P. Manganari (1833) [1]; on the right – a modern bathymetric map [4]

Краткая характеристика района исследования

Развитие рельефа Азовского моря проходило под воздействием трансгрессивно-регрессивных циклов Азово-Черноморского бассейна. Определяющую роль в формировании исходного донного рельефа и накоплении донных отложений в плиоцен-четвертичное время сыграла флювиальная деятельность Дона и других рек [5]. В трансгрессивные эпохи происходило перераспределение накопленного аллювиального материала и преобладала морская аккумуляция, в результате которой неровности подводного рельефа сглаживались. Современный рельеф дна моря отличается большой выположенностью (рис. 1). Однако в пределах восточной части моря имеются крупные положительные формы рельефа.

В настоящее время основными поставщиками пляжеобразующего материала для питания современных аккумулятивных форм Азовского моря являются продукты абразии коренных берегов и материал биогенного происхождения, поступающий со дна моря [6]. Продукты абразии играли некоторую роль на начальных стадиях образования аккумулятивных форм, тем не менее роль биогенного источника в настоящее время значительно важнее. Биогенным материалом сформировано большинство кос Азовского моря, особенно их дистальные части. Часто основание аккумулятивного тела кос и их корневая часть сложены продуктами абразии, а дистальная часть – биогенным материалом.

Циркуляция воздушных масс над акваторией Азовского моря в течение года отличается широтной направленностью. Зимой преобладают ветра восточной четверти, в теплый период преобладает западный перенос. Соответственно, с учетом конфигурации моря в районе банки Еленина проявляется роль как западных, так и восточных волнений. В узком и мелководном Таганрогском заливе при сильных западных ветрах формируется нагон, величина которого достигает нескольких метров, а при восточных ветрах – сгон. Поскольку банка Еленина примыкает к Ейскому полуострову, играющему роль барьера на входе в Таганрогский залив, у его северной оконечности формируются мощные течения, скорость которых может достигать 1–1,5 м/с, а направление обычно совпадает с направлением ветра.

Материалы и методы

В представленной работе исследования подводного рельефа проводились на основе дистанционных данных. В качестве исходных данных использовались снимки спутника дистанционного зондирования Sentinel-2 периода 2015–2018 гг. Предварительно был произведен визуальный анализ снимков. Критериями отбора были отсутствие облачности, отсутствие сильного волнения и поверхностной пленки, минимальная площадь зон повышенной мутности. На следующем этапе была проведена обработка изображений, включающая в себя атмосферную коррекцию, коррекцию солнечных бликов и создание маски водной поверхности. Атмосферная коррекция производилась в модуле Sen2Core программы ESA SNAP [7]. Для коррекции солнечных бликов использовался алгоритм Хедли [8]. Программная реализация построения карт глубин производилась с использованием сертифицированного программного обеспечения ScanEx Image Processor. Для определения глубин были использованы алгоритмы Stumpf и Lyzenga [9, 10]. В качестве базовых карт использовались современные навигационные карты [11].

В результате по данным Sentinel-2 за разные даты построена цифровая модель подводного рельефа (рис. 3). Пространственное разрешение полученной модели равно разрешению исходных снимков (10 м).

Результаты и обсуждение

Общая длина банки Еленина – около 40 км (рис. 2), ширина – до 5 км, минимальные глубины – 1,5–2 м. Рельеф и конфигурация банки Еленина не позволяет предположить наличие в настоящее время мощного продольного движения наносов, инициируемого волнами. При этом, исходя из рельефа на профиле Е9 (рис. 3, 4), можно предположить возможность движения наносов вдоль северного склона аккумулятивной формы в периоды усиления течений, направленных со стороны Таганрогского залива. Вероятно, наличие аккумулятивного тела банки Еленина способ-

ствует формированию к северу от нее сильных и устойчивых по направлению течений, приводящих в движение наносы даже на большой глубине. Как отмечено в работе [12], в полях взвеси в верхнем слое Азовского моря банка Еленина отчетливо проявляется при интенсивном северо-восточном ветровом воздействии. В работе [13] дно к северу от банки Еленина отнесено к участку с преобладанием флювиальных (течениевых) литодинамических условий, к югу от нее – смешанные флювиально-волновые условия, вдоль берега – волновые.

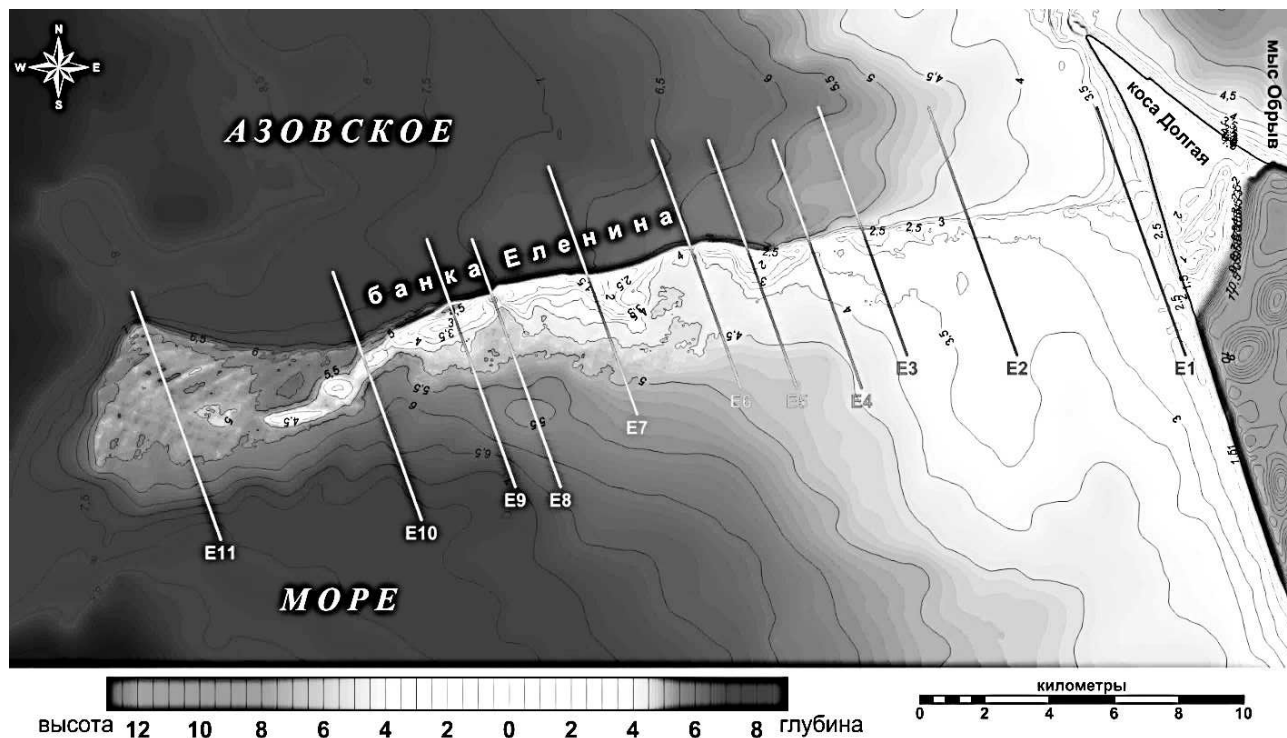


Рис 3. Цифровая модель рельефа банки Еленина
 / Fig. 3. Digital elevation model of the Elenina Bank

У западной оконечности банки, в районе профиля E11, расположены особые формы рельефа (рис. 3, 4). Прослеживаются 8 дуговидных гряд (волн) длиной до 6 км, расстояние между соседними – 0,3–0,5 км, высота гребней – около 0,5 м. Данные формы могут являться реликтовыми дистальными оконечностями, подобные которым имеются на современных косах Азовского моря. Еще одним вариантом возникновения таких форм может быть проявление современных гидрогенных процессов – пульсирующих движений воды, возникающих при обтекании большими массами воды оконечности банки Еленина во время сгонно-нагонных или сейшевых явлений. Подобные формы обнаружены [14] у оконечности подводной отмели косы Долгой. К сожалению, использованная методика построения карт донного рельефа не позволяет получить достоверные сведения для глубин более 6 м в акваториях с высокой мутностью воды. Вероятно, там также имеются формы рельефа, позволяющие выявить особенности современного и предшествующих этапов развития банки Еленина.

Как на самой банке Еленина, так и на обширном пространстве дна к югу от неё происходит продуцирование больших объемов ракуши. По сведениям [2, 3], на банке Еленина в грунте присутствуют «красноватые мелкие ракушки». Этому описанию соответствует внешний облик одного из самых массовых видов раковинных моллюсков Азовского моря – *Cerastoderma glaucum* (Poiret, 1789) [15]. Этот моллюск, отличающийся большой продуктивностью и прочностью створки к механическому воздействию, играет важнейшую роль в образовании пляжеобразующих осадков Азовского моря [16]. Например, в составе отложений косы Долгой и её подводной отмели содержится свыше 80 %, а на островах – до 90–95 % створок *Cerastoderma* [17, 18]. До зарегулирования р. Дон (1950–1952 гг.) биоценоз *Cerastoderma* формировался на 38 % дна Азовского моря.

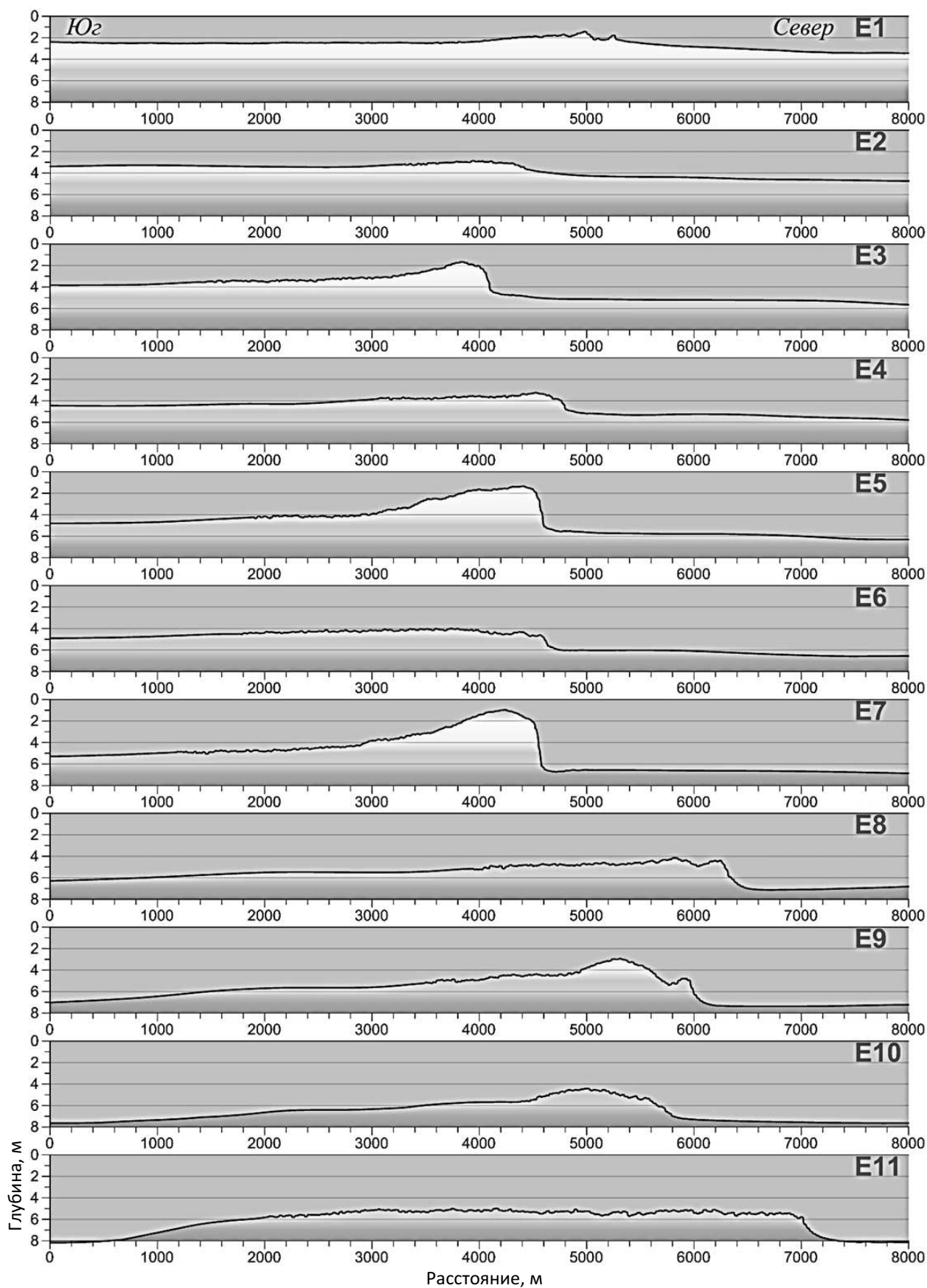


Рис. 4. Поперечные профили рельефа банки Еленина (положение профилей показано на рис. 3)
/ Fig. 4. Transverse relief profiles of the Elenina Bank (the position of the profiles is shown in Fig. 3)

Резкие колебания гидрохимических параметров, сероводородное заражение и появление видов-вселенцев привели к изменению видового состава биоценозов моллюсков и их продуктивности. Увеличились площади сообществ с участием вселенца *Mya arenaria*, более устойчивого к дефициту кислорода [19]. Створки *Mya arenaria* обладают большими размерами, в 2–3 раза превышающими размеры *C. glaucum*, поэтому обычно накапливаются в зоне продуцирования и не поступают на берег [20]. С конца XX в. на многих участках дна Азовского моря (в том числе на банке Еленина) наблюдается замещение биоценозов *Cerastoderma* биоценозами, где доминирует вселенец *Anadara kagoshimensis* [21]. Раковина *A. kagoshimensis* превосходит по толщине одномерную раковину *C. glaucum* в полтора раза, растет на 25 % быстрее, а вид более устойчив к недостатку кислорода. При условии сохранения современных тенденций можно предположить постепенный рост общих запасов ракуши в ЮВ части Азовского моря за счет распространения видов вселенцев, обладающих большими скоростями роста раковин и их массы и более высокой толерантностью к условиям среды.

Поперечный профиль банки Еленина (рис. 4) указывает на современное преобладающее направление движения наносов – на север. Дно к югу от банки представлено пологой абразионной подводной террасой (бенчем) [22], образовавшейся в ходе отступления коренного берега. Уклон дна и волновой режим способствуют активной миграции наносов (преимущественно ракуши) на С-СЗ-З. Таким образом, ракуша, влекомая течениями и волнами по пологому южному склону банки Еленина, достигает северного края аккумулятивного тела, расположенного над резким свалом глубин (бортом долины Палео-Дона). Дальнейшее выдвигание аккумулятивного тела на север практически отсутствует, поскольку по мере увеличения глубин требует все большего объема наносов. В работе [23] показано, что в почти двухметровой толще современных донных осадков между подводной отмелью косы Долгой и банкой Еленина, где расположена зона больших глубин, ракуша отсутствует. Очевидно, что банка Еленина аккумулирует ракушу, продуцируемую в её пределах или влекомую по дну с юга, что определяет рост протяженности и мощности аккумулятивной формы. Соответственно, данная форма рельефа является литодинамически активной.

По данным 2020–2022 гг. на берегах косы Долгой в составе наносов по-прежнему преобладают створки *C. glaucum* [18]. Вероятно, это обусловлено влиянием банки Еленина. На косу Долгую с ЮЗ могут поступать только наносы, перемещаемые непосредственно вдоль берега. Преимущественно это более легкие и подвижные створки *C. glaucum*. Однако во время экстремальных гидрологических событий (штормы, усиление придонных течений) к берегу могут поступать и более массивные створки *A. kagoshimensis* и *M. arenaria*. Таким образом, на современном этапе своего развития аккумулятивное тело банки Еленина продолжает оказывать влияние на литодинамический режим прилегающей части Азовского моря, прежде всего на косу Долгую.

Заключение

Полученные данные показали, что в настоящее время банка Еленина является активной аккумулятивной формой – она аккумулирует ракушу, продуцируемую в её пределах и влекомую волнами с юга. Кроме того, на современном этапе своего развития аккумулятивное тело банки Еленина продолжает оказывать влияние на литодинамический и гидрологический режим прилегающей части Азовского моря.

Список источников

1. Парасома. URL: <http://parasoma.narod.ru/maps-index.htm> (дата обращения: 10.03.2022).
2. Будищев И.М. Морской путеводитель по Азовскому и Черному морям. СПб.: Морская тип., 1808. Ч. 1. 65 с.
3. Сухомлин А.М. Лоция Азовского моря и Керченского пролива. Николаев: Черноморское гидрографическое депо, 1854. 96 с.
4. Матишов Г.Г. Новые данные о геоморфологии дна Азовского моря // Докл. АН. 2006. Т. 409, № 3. С. 375–380.
5. Мищенко А.А., Волкова Т.А., Миненкова В.В., Антипова Ю.О. Палеогеография Черного и Азовского морей и их побережий в плейстоцене и голоцене (в пределах Краснодарского края) // Изв. Дагестанского гос. пед. ун-та. Естеств. и точн. науки. 2018. Т. 12, № 1. С. 65–72.

6. Мамыкина В.А., Хрусталева Ю.П. Береговая зона Азовского моря. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1980. 176 с.
7. Sentinel Online technical website. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (дата обращения: 03.02.2022).
8. Hedley J.D., Harborne A.R., Mumby P.J. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos // Intern. J. Remote Sensing. 2005. Vol. 26 (10). P. 2107–2112.
9. Stumpf R., Holderied K., Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. // Limnol. Oceanogr. 2003. Vol. 48 (1). P. 547–556.
10. Lyzenga D.R., Malinas N.P., Tanis F.J. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2006. Vol. 44(8). P. 2251–2259.
11. Навионикс. URL: <https://navionics.ru/katalog-kart> (дата обращения: 10.02.2022).
12. Кочергин С. В. Идентификация структур рельефа дна в Азовском море по спутниковым данным // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 10. С. 68–71.
13. Буркацкий О.Н., Аксенов В.А., Кузьмин В.Ю. Ландшафтно-экологическое районирование юго-восточной части Азовского моря // Морские биологические исследования: достижения и перспективы : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. С. 283–286.
14. Krylenko V., Aleinikov A., Krylenko M., Beliaeva N., Moiseeva N. Possibility of the underwater topography studying of large accumulative forms according to Sentinel-2 data // Seventh Intern. Conf. on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019). 2019. Vol. 11174. P. 111741. Doi: 10.1117/12.2532292.
15. World Register of Marine Species. URL: <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=138999> (дата обращения: 17.06.2022).
16. Ивлиева О.В., Фроленко Л.Н. Биогенное карбонатакопление Азовского моря во второй половине XX века // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2009. № 4. С. 96–99.
17. Ивлиева О.В. Влияние биогенного фактора на современное осадконакопление Азовского моря // Геология, география и экология океана : материалы Междунар. науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова (8–11 июня 2009 г., г. Ростов-на-Дону). Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 135–137.
18. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Кулыгин В.В., Титов В.В., Коваленко Е.П., Сушко К.С. Новые данные о строении косы Долгой Азовского моря (бурение, исследование обнажений, малакофауна) // Наука Юга России. 2020. Т. 16, № 3. С. 26–39.
19. Савикин А.И., Набоженко М.В. Распространение двустворчатого моллюска *Cerastoderma glaucum* (Poiret, 1789) (Bivalvia: cardiidae) в Таганрогском заливе Азовского моря // Вестн. ЮНЦ РАН. 2010. Т. 6, № 4. С. 105–107.
20. Савчук М.Я. *Mya arenaria* – новый элемент Азовского моря // Вестн. зоологии. 1980. № 5. С. 11–15.
21. Живоглядова Л.А., Ревков Н.К., Фроленко Л.Н., Афанасьев Д.Ф. Экспансия двустворчатого моллюска *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) в Азовском море // Рос. журн. биол. инвазий. 2021. Т. 14, № 1. С. 83–94.
22. Экологический атлас Азовского моря / гл. ред. Г.Г. Матишов; отв. ред. Н.И. Голубева, В.В. Сорочкина. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 328 с.
23. Матишов Г. Г., Ковалева Г. В., Польшин В. В. Новые данные о скорости седиментации в Азовском море в позднем голоцене // Докл. АН. 2009. Т. 428, № 6. С. 820–823.

References

1. *Papacoma*. Available from: <http://papacoma.narod.ru/maps-index.htm> [Accessed 10th March 2022]. (In Russ.).
2. Budishchev I.M. *Marine guide to the Azov and Black seas*. Saint Petersburg: Marine Printing House; 1808. Part 1. 65 p. (In Russ.).
3. Sukhomlin A.M. *Sailing directions of the Sea of Azov and the Kerch Strait*. Nikolaev: Black Sea Hydrographic Depot Press; 1854. 96 p. (In Russ.).
4. Matishov G.G. New data on the geomorphology of the bottom of the Sea of Azov. *Dokl. AN = Proceedings of the Academy of Sciences*. 2006;409(3):375-380. (In Russ.).
5. Mishchenko A.A., Volkova T.A., Minenkova V.V., Antiptseva Yu.O. Paleogeography of the Black and Azov seas and their coasts in the Pleistocene and Holocene (within the Krasnodar Krai). *Izvestiya DGPU. Estestvennye i tochnye nauki = Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*. 2018;12(1):65-72. (In Russ.).
6. Мамыкина В.А., Хрусталева Ю.П. *Coastal zone of the Sea of Azov*. Rostov-on-Don: Rostov State University Press; 1980. 176 p. (In Russ.).
7. Sentinel Online technical website. Available from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> [Accessed 3rd February 2022].

8. Hedley J.D., Harborne A.R., Mumby P.J. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *Intern. J. Remote Sensing*. 2005;26(10):2107-2112.
9. Stumpf R., Holderied K., Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnol. Oceanogr.* 2003;48(1):547-556.
10. Lyzenga D.R., Malinas N.P., Tanis F.J. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006;44(8):2251-2259.
11. Navioniks. Available from: <https://navionics.ru/katalog-kart> [Accessed 10th February 2022]. (In Russ.).
12. Kochergin S.V. Identification of bottom relief structures in the Sea of Azov from satellite data. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy = Monitoring Systems of Environment*. 2017;(10):68-71. (In Russ.).
13. Burkatskii O.N., Aksenov V.A., Kuzmin V.Yu. Landscape and ecological zoning of the southeastern part of the Sea of Azov. *Marine biological research: achievements and prospects*. Materials of All-Russian Scientific and Practical Conference. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika Publ.; 2016:283-286. (In Russ.).
14. Krylenko V., Aleinikov A., Krylenko M., Beliaeva N., Moiseeva N. Possibility of the underwater topography studying of large accumulative forms according to Sentinel-2 data. *Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019)*. 2019;11174:111741, doi: 10.1117/12.2532292.
15. *World Register of Marine Species*. Available from: <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=138999> [Accessed 17th June 2022].
16. Ivlieva O.V., Frolenko L.N. Biogenic carbonate accumulation of the Sea of Azov in the second half of the 20th century. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2009;(4):96-99. (In Russ.).
17. Ivlieva O.V. Influence of the biogenic factor on the modern sedimentation of the Sea of Azov. *Geology, Geography and Ecology of the Ocean: Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of D.G. Panov (June 8-11, 2009, Rostov-on-Don)*. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2009:135-137. (In Russ.).
18. Matishov G.G., Polshin V.V., Kulygin V.V., Titov V.V., Kovalenko E.P., Sushko K.S. New data on the structure of the Dolgaya spit of the Sea of Azov (drilling, study of outcrops, malacofauna). *Nauka Yuga Rossii = Science in the South Russia*. 2020;16(3):26-39. (In Russ.).
19. Savikin A.I., Nabozhenko M.V. Distribution of bivalvia *Cerastoderma glaucum* (Poiret, 1789) (*Bivalvia: cardiidae*) in the Taganrog Bay of the Sea of Azov. *Vestn. YuNTs RAN = Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010;6(4):105-107. (In Russ.).
20. Savchuk M.Ya. *Mya arenaria* – new element of the Sea of Azov. *Vestnik zoologii = Bulletin of Zoology*. 1980;(5):11-15. (In Russ.).
21. Zhivoglyadova L.A., Revkov N.K., Frolenko L.N., Afanasyev D.F. Expansion of the bivalve mollusk *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) in the Sea of Azov. *Ros. zhurn. biol. invazii = Russian Journal of Biological Invasions*. 2021;14(1):83-94. (In Russ.).
22. Matishov G.G., Golubeva N.I., Sorokina V.V., eds. *Ecological atlas of the Sea of Azov*. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2011. 328 p. (In Russ.).
23. Matishov G.G., Kovaleva G.V., Pol'shin V.V. New data on sedimentation rate in the Sea of Azov in the late Holocene. *Dokl. AN = Proceedings of the Academy of Sciences*. 2009;428(6):820-823. (In Russ.).

Информация об авторах

В.В. Крыленко – кандидат географических наук, старший научный сотрудник.
М.В. Крыленко – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

V.V. Krylenko - Candidate of Science (Geography), Senior Researcher.
M.V. Krylenko - Candidate of Science (Geography), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 02.11.2022; одобрена после рецензирования 20.01.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 02.11.2022; approved after reviewing 20.01.2023; accepted for publication 19.05.2023.

Научная статья
УДК 528.81
doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-90-95

ЭКОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТУРИЗМА В ВЫСОКОГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Ильхам Ильдырым оглу Марданов

Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Республика Азербайджан
geography.sumqayit@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена анализу возможностей развития различных видов туризма в высокогорных территориях Большого и Малого Кавказа (Азербайджанская Республика), отличающихся сложными экогеографическими условиями. Анализ проводился на основе обработки многочисленных данных полевых и камеральных исследований, что позволило выявить различия в проявлении природных факторов. В той или иной степени эти факторы влияют на развитие туристической индустрии и ландшафтного планирования на отдельных массивах Большого и Малого Кавказа, в том числе Гарабахского вулканического нагорья, имеющего более дальнюю перспективу развития этой отрасли. Для оценки почвенных условий с точки зрения развития туризма были проанализированы данные полевых и камеральных почвенных и ландшафтных изысканий, изучены имеющиеся литературные и картографические материалы и социально-экономические и психологические предпосылки возникающих экологических проблем. В этом направлении тщательно проверялись морфометрические показатели рельефа, исследовалась степень подверженности территории гравитационным процессам – оползням, осыпям, россыпям, почвенной эрозии и оценивалась интенсивность их развития. Большое значение имеет сравнительный анализ и обобщение геоморфологических, почвенно-эрозионных и геоботанических карт. На основе анализа карты уклонов склонов были выявлены наиболее благоприятные участки для размещения объектов экотуризма, которые уточнялись с помощью имеющихся почвенно-эрозионных карт (масштаб 1:100000 и 1:25000).

Ключевые слова: регион, уклоны, экогеоморфологические условия, ландшафт, горизонт, аэрокосмические снимки, оползень, почва

Для цитирования: Марданов И.И. Экогеографические предпосылки и проблемы развития туризма в высокогорных территориях // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 90–95.

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

Original article

ECOGEOGRAPHICAL BACKGROUND AND PROBLEMS OF TOURISM DEVELOPMENT IN HIGH-MOUNTAINOUS TERRITORIES

Ilham I. Mardanov

Sumgait State University, Sumgait, Republic of Azerbaijan
geography.sumqayit@mail.ru

Abstract. This work is devoted to the analysis of the possibilities for the development of various types of tourism in the high-mountainous territories of the Greater and Lesser Caucasus (Republic of Azerbaijan), which are distinguished by complex ecogeographical conditions, and where various landscape tracts are formed. This work was carried out on the basis of processing various data from field and cameral studies conducted in different years, which made it possible to identify differences in the manifestation of natural factors. These factors to some extent affect the development of the tourism industry, and in general, landscape planning in certain massifs of the Greater and Lesser Caucasus, including the Garabagh volcanic highlands, which has a longer perspective for the development of this industry. To assess soil conditions from the point of view of tourism development, field and

© Марданов И.И., 2023

cameral soil and landscape survey data were analyzed, the available literature and cartographic materials were analyzed, and socio-economic and psychological prerequisites for emerging environmental problems were compared. In this direction, the analysis of morphometric indicators of the relief, the study of the degree of exposure of the territory to gravitational processes - landslides, screes, placers, soil erosion and the assessment of the intensity of their development were carried out. Of great importance is the comparative analysis and generalization of geomorphological, soil erosion and geo botanical maps. Based on the analysis of the slope slope map, the most favorable areas for the placement of ecotourism facilities were identified, which were refined using the available soil erosion maps at a scale of 1:100 000 and 1:25 000.

Keywords: region, inclining, ecogeomorphological conditions, landscape, horizon, aerospace images, landslide, soil

For citation: Mardanov I.I. Ecogeographical Background and Problems of Tourism Development in High-Mountainous Territories. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):90-95. (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

Исследованию рекреационных возможностей горных геосистем посвящены труды многих отечественных и иностранных ученых [1–3]. Вопросы развития туристической деятельности в высокогорьях с каждым годом становятся все более актуальными по причине роста людского потока и развития инфраструктуры. Это делает необходимым проведение оценки экодинамической и экологической устойчивости ландшафтов, отдельных их компонентов. Актуальность экологической оценки очевидна в условиях происходящих климатических изменений [4, 5]. Колебания климата отражаются на состоянии ледников, их количественных показателях. Это отмечают многие исследователи. Данный факт может внести изменения в работы по строительству туристических объектов на высокогорных территориях, ныне используемых в основном в качестве летних пастбищ и сенокосов [6]. Горные леса представляют собой обширные заповедные территории. За их пределами находятся населенные пункты, вокруг которых расположены различные хозяйственные объекты, сады, присельские выгоны и т.д.

Цели и задачи

На основе накопленного опыта полевых исследований и интерпретации аэрокосмических снимков выявлены возможности развития этнографического, экстремального туризма и альпинизма на отдельных высокогорных массивах азербайджанской части Большого Кавказа, протянувшегося с северо-запада, с российской и грузинской границы, на юго-восток, до Апшеронского полуострова. Это сделано с целью оптимального размещения туристических объектов, например на массивах Шахдаг, Гызылгая, Ахвай и т.д. На территории имеются такие природные памятники, как водопады, скальные утесы, оползневые участки, обширные субальпийские и альпийские луга, отличающиеся суровым климатом. Такие скальные массивы широко распространены в районе Шахдаг с наивысшей точкой 4243 м над уровнем моря. Эти места имеют большие перспективы для развития альпинизма международного уровня, а близлежащие села могут сыграть роль логистических баз и подготовительных центров (рисунок), привлечь внимание любителей этнографического туризма, так как многие из них являются местами компактного проживания лезгинов. Благоприятные условия для этнографического туризма имеются и на многих территориях южного склона Большого Кавказа, где проживают различные малые народности, сохранившие свой язык и традиции, как, например, лагичи (бассейн р. Гирдыманчай), принадлежащие к иранской языковой группе. По существующей в Азербайджане классификации на этих территориях распространены холодные типы климата. Данный факт и большие уклоны склонов делают необходимым осуществление специальной подготовки перед посещением этих территорий. Наиболее высокими вершинами и преобладанием склонов с очень большой крутизной отличается центральная часть Главного Кавказского хребта, охватывающая междуречье рек Шинчай – Кишчай – Гурмухчай [7].

Материалы и методы

Для оценки экогеографических условий с точки зрения развития туризма были проанализированы данные различных исследований, социально-экономические и психологические стороны экологических проблем, проведен обзор существующих литературных и картографических материалов, отражающих экзодинамическую ситуацию на различных горных территориях [8–11].

Большую роль в оценке экогеографической ситуации играют сравнительный анализ и обобщение карт различного содержания. Такой анализ имеет и прикладное значение, в том числе с точки зрения развития туризма, строительства туристических объектов.

Результаты и их обсуждение

Довольно часто причиной ширины высокогорного пояса азербайджанской части Большого Кавказа, достигающего порой 30 км, являются меньшие уклоны поверхности в некоторых местах. Интенсивная вырубка на многих участках верхней части горных лесов, особенно вокруг сел, расположенных в высокогорьях, привела к расширению горно-лугового ландшафтного пояса. Вырубка лесов способствует опусканию нижней границы горных лугов и сенокосов порой до высот 1600–1700 м в пределах расположения горно-лесного пояса.

На территориях с высокой скелетностью почв, с нарастающей степенью эрозии почвенного покрова при наличии слоистых известковых пород сильно затрудняются пешие переходы. Поэтому увеличивается важность прокладывания троп для туристов. Но именно такие территории могут привлечь любителей экстремального туризма, особенно в зимнее время, когда в туристической индустрии этого региона наступает определенное затишье.

На основе анализа карты уклонов поверхности склонов (масштаб 1:100000) и крупномасштабных почвенно-эрозионных карт наиболее крутосклонных участков были уточнены места скопления осыпей и россыпей, которые идентифицированы нами как экстремальные территории для продвижения и строительства.

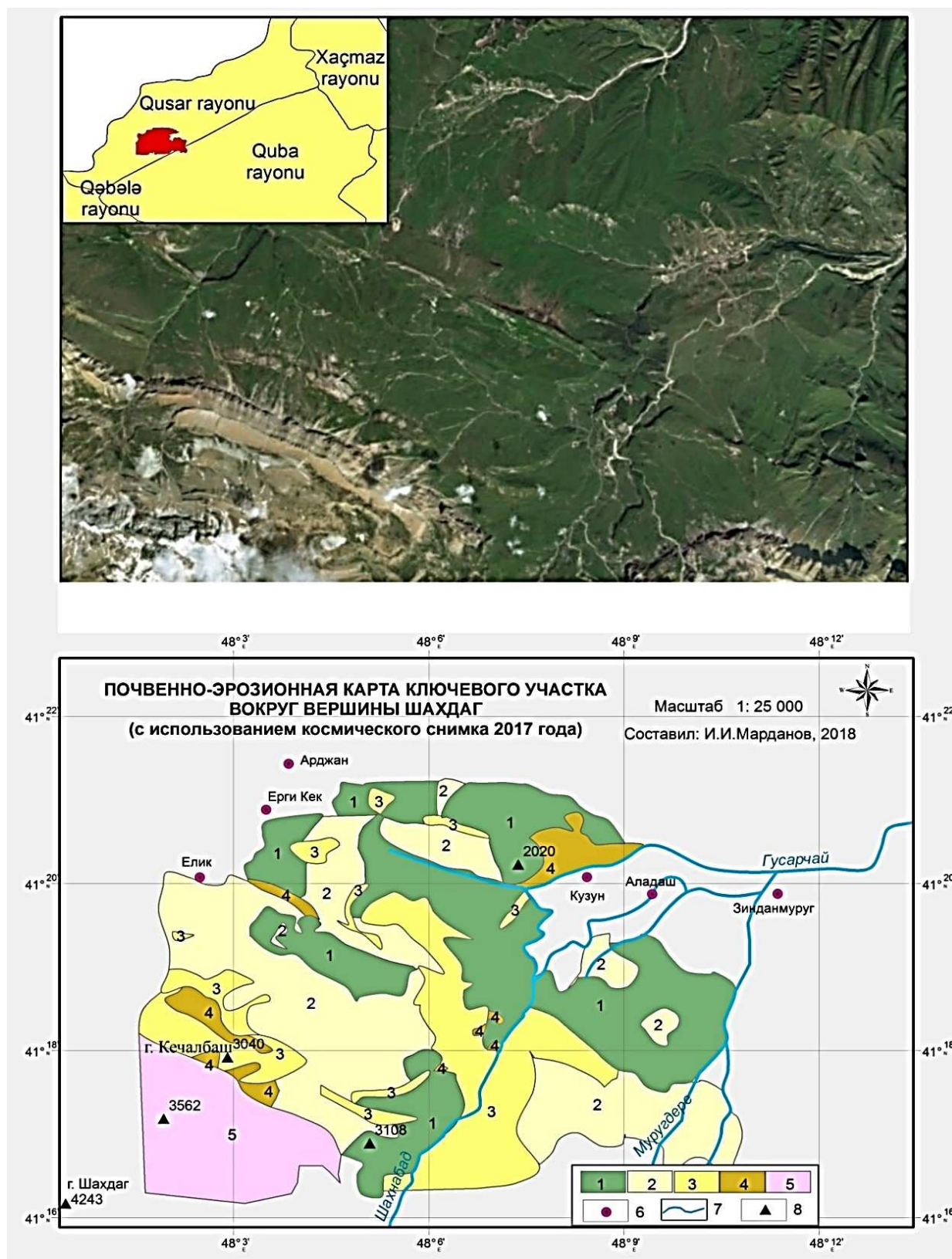
Как отмечают многие исследователи, оползни юго-восточной оконечности Большого Кавказа, входящей в пределы Азербайджана, являются важной частью высокогорного ландшафта и характеризуются сложной ландшафтной структурой, на которую влияет изменение высотного положения оползневых масс. Здесь особо можно выделить Химранский, Дамирчайский, Караузчайский оползни-потоки, на которых часто встречаются луговые, кустарниковые урочища, свежие оползневые материалы, которые могут заинтересовать любителей познавательного туризма.

Важное место на территории Малого Кавказа занимает Гарабахское вулканическое нагорье, часть которого входит в пределы Лачинского административного района. Геоморфологические условия и здесь являются сложными. На проанализированной топографической карте территории наблюдается увеличение абсолютной высоты в западном направлении. Компьютерная обработка топографических карт и космических снимков в состоянии определить возможности освоения рельефа территории на основе показателей уклонов поверхностей.

В результате анализа топографической карты выявлено, что лесные участки в пределах территории широко распространены в речных долинах, особенно в верхних течениях рек Гочазсу и Шалва. Прокладываемая дорога Губадлы – Лачин проходит близ этих лесов, расположенных на востоке и севере района. Они могут функционировать как важные туристические ареалы для рекреации при благоприятных экономических условиях.

В пределах территории к северу и западу от селения Минкенд в сторону границы с Арменией абсолютные высоты варьируют в пределах 2000–3400 м. Именно на этой территории относительно меньшие уклоны поверхностей наряду с традиционными отраслями хозяйства создают возможности для развития туристического бизнеса, активного отдыха, пеших походов по территориям горных лугов. Любителей древности могут привлечь развалины древних населенных пунктов, культовых сооружений, расположенных на данной территории.

Надо учесть, что именно на этом участке расположены известный вулкан Бююк Ишыглы (3550,4 м), вершина Кичик Ишыглы (3450,6 м), озеро Гарагель. Эти объекты рассматриваются в качестве природных памятников и, безусловно, могут привлечь внимание как местных, так и иностранных туристов.



Почвенно-эрозионная карта ключевого участка вокруг вершины Шахдаг (4243 м), составленная с использованием космического снимка 2017 г.: 1 – неэродированные участки; 2 – слабоэродированные участки; 3 – среднеэродированные участки; 4 – сильноэродированные участки; 5 – скальные обнажения; 6 – села; 7 – реки; 8 – отметки высоты. Масштаб 1:25000. Составил И.И. Марданов, 2018 г. / Soil erosion map of the key area around the Shahdag peak (4243 m), compiled using a 2017 satellite image: 1 - non-eroded areas; 2 - weakly eroded areas; 3 - moderately eroded areas; 4 - strongly eroded areas; 5 - rock outcrops; 6 - villages; 7 - rivers; 8 - height marks. Scale 1:25000. Compiled by I.I. Mardanov, 2018

Выводы

Наличие склонов с большой крутизной поверхности, отсутствие разветвленной дорожной инфраструктуры являются факторами, осложняющими строительные работы.

Отдельная проблема – уточнение всех расположенных в горно-луговом поясе исторических памятников, охрана которых должна согласовываться с работами по восстановлению горных ландшафтов.

Высокогорные территории Большого и Малого Кавказа нуждаются в развитии инфраструктуры. Отношение к ним как бесперспективным районам имело пагубные последствия. Эту проблему необходимо решать комплексно.

Большая вероятность чрезвычайных ситуаций при природно-разрушительных процессах, крутосклонный рельеф, горные реки, полноводные и с быстрым течением в период таяния снегов, ливневых дождей, – всё это увеличивает требования к обеспечению различных мер безопасного осуществления туристической деятельности. Пока этот момент немного отходит на второй план.

На высокогорных территориях предоставляются прогулочные услуги, популярны однодневные поездки на автобусах, налажена сеть ресторанов, где предлагается определенный набор блюд национальной кухни. Существуют центры зимнего отдыха Шахдаг и Туфандаг, где действуют канатная дорога, лыжная трасса, служба инструкторов, рестораны, отели.

Развитие туризма в высокогорных территориях Малого Кавказа пока не достигло нужного уровня по причине слабой освоенности, хотя природные условия и исторические памятники как исламского, так и более древнего, христианского периода истории Азербайджана (церкви времен Кавказской Албании) создают большие возможности в этом направлении.

Список источников

1. Кучинская И.Я. Ландшафтно-экологическая дифференциация горных геосистем (на примере северного склона Юго-Восточного Кавказа). Баку, 2011. 195 с.
2. Korotkov K.O., Belonovskaya E.A. Syntaxonomical Survey of Alpine Meadows in the Great Caucasus // *Fragmenta geobotanica (Polish Botanical Journal)*. 2000. Vol. 45, № 1-2. P. 323–343.
3. Керимова Э.Д., Кучинская И.Я. Геоэкологический анализ ландшафтной структуры селеносных бассейнов южного склона Большого Кавказа // *Грозненский естественно-научный бюллетень*. 2018. Т. 3, № 2 (10). С. 49–57. Doi: 10.25744/genb.2018.10.2.006.
4. Kalvoda J., Emmer A. Mass wasting and erosion in different morphoclimatic zones of the Makalu Barun region, Nepal Himalaya // *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2021. Vol. 103, iss. 4. P. 368–396. <https://doi.org/10.1080/04353676.2021.2000816>.
5. Whalley W.B. Gruben glacier and rock glacier, Wallis, Switzerland: glacier ice exposures and their interpretation // *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography*. 2020. Vol. 102, iss. 2. P. 141–161. <https://doi.org/10.1080/04353676.2020.1765578>.
6. Magori B., Urdea P., Onaca A. Distribution and characteristics of rock glaciers in the Balkan Peninsula // *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography*. 2020. Vol. 102, iss. 4. P. 354–375. <https://doi.org/10.1080/04353676.2020.1809905>.
7. Tarikhazer S.A., Kuchinskaya I.Y., Karimova E.J., Alakbarova S.O. Issues of geomorphological-landscape risk (on the example of the Kishchay river) // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2021. Vol. 6, № 450. P. 133–140.
8. Исмаилов А.И. Применение ГИС-технологий в почвенно-экологических исследованиях в Азербайджанской Республике // *Почвы Азербайджана: генезис, география, мелиорация, рациональное использование и экология* : Междунар. науч. конф. Баку, 2012. Т. XII, ч. I. С. 268–272.
9. Tarikhazer S.A. Morphometric analysis of the relief of the North-Eastern slope of the Great Caucasus for the purpose of tourism potential (using GIS technologies) // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2020. Vol. 2. P. 170–177.
10. Ализаде Э.К., Тарихазер С.А., Кучинская И.Я., Гулиева С.Ю. Ландшафтно-геоморфологическая оценка рекреационного потенциала горных геосистем (на примере азербайджанской части Большого Кавказа) // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2017. Т. 9, № 2(32). С. 130–140.
11. Воскова А.В., Гуня А.Н., Караваев В.А., Марьянских Д.М. Землепользование и возможности регулирования антропогенной нагрузки на горные ландшафты северного макросклона Большого Кавказа (на примере долины р. Карасу) // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021. Т. 13, № 1 (47). С. 16–24.

References

1. Kuchinskaya I.Ya. *Landscape-ecological differentiation of mountain geosystems (on the example of the northern slope of the South-Eastern Caucasus)*. Baku, 2011. 195 p. (In Russ.).
2. Korotkov K.O., Belonovskaya E.A. Syntaxonomical Survey of Alpine Meadows in the Great Caucasus. *Fragmenta geobotanica (Polish Botanical Journal)*. 2000;45(1-2):323-343.
3. Kerimova E.D., Kuchinskaya I.Ya. Geocological analysis of the landscape structure of the mudflow basins of the southern slope of the Greater Caucasus. *Groznenskii estestvenno-nauchnyi byulleten' = Grozny Natural Science Bulletin*. 2018;3(2):49-57, doi: 10.25744/genb.2018.10.2.006. (In Russ.).
4. Kalvoda J., Emmer A. Mass wasting and erosion in different morphoclimatic zones of the Makalu Barun region, Nepal Himalaya. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2021;103(4):368-396, <https://doi.org/10.1080/04353676.2021.2000816>.
5. Whalley W.B. Gruben glacier and rock glacier, Wallis, Switzerland: glacier ice exposures and their interpretation. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2020;102(2):141-161, <https://doi.org/10.1080/04353676.2020.1765578>.
6. Magori B., Urdea P., Onaca A. Distribution and characteristics of rock glaciers in the Balkan Peninsula. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2020;102(4):354-375, <https://doi.org/10.1080/04353676.2020.1809905>.
7. Tarikhazer S.A., Kuchinskaya I.Y., Karimova E.J., Alakbarova S.O. Issues of geomorphological-landscape risk (on the example of the Kishchay river). *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2021;6(450):133-140.
8. Ismailov A.I. Application of GIS technologies in soil-ecological research in the Republic of Azerbaijan. *Soils of Azerbaijan: Genesis, geography, melioration, rational use and ecology*. International Scientific Conference. Baku, 2012;XII(I):268-272. (In Russ.).
9. Tarikhazer S.A. Morphometric analysis of the relief of the North-Eastern slope of the Great Caucasus for the purpose of tourism potential (using GIS technologies). *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2020;2:170-177.
10. Alizade E.K., Tarikhazer S.A., Kuchinskaya I.Ya., Gulieva S.Yu. Landscape and geomorphological assessment of the recreational potential of mountain geosystems (on the example of the Azerbaijani part of the Greater Caucasus). *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017;9(2):130-140. (In Russ.).
11. Voskova A.V., Gunya A.N., Karavaev V.A., Maryinskikh D.M. Land use and the possibilities of regulating the anthropogenic load on the mountain landscapes of the northern macroslope of the Greater Caucasus (on the example of the Karasu river valley). *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(1):16-24. (In Russ.).

Информация об авторе

И.И. Марданов – доктор географических наук, профессор, кафедры географии и методики ее преподавания.

Information about the author

I.I. Mardanov - Doctor of Science (Geography), Professor, Department of Geography and Methodics of its Teaching.

Статья поступила в редакцию 08.02.2023; одобрена после рецензирования 15.03.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 08.02.2023; approved after reviewing 15.03.2023; accepted for publication 19.05.2023.

Научная статья

УДК 631.422

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-96-102

АНАЛИЗ НАКОПЛЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ СЕРЫ В ПОЧВЕ ГОРОДА АТЫРАУ

Дамиля Кенесовна Рыскалиева¹, Мансия Санаковна Есенаманова², Самал Сырлыбеккызы³, Людмила Халгаевна Сангаджиева⁴

^{1, 3} Каспийский университет технологий и инженеринга им. Ш. Есенова, Актау, Республика Казахстан

² Атырауский государственный университет им. Х. Досмухамедова, Атырау, Республика Казахстан

⁴ Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова, Элиста, Республика Калмыкия, Россия

¹damilya03@gmail.com

²mansiya.73@mail.ru

³samal.syrlybekkyzy@yu.edu.kz

⁴chalga_ls@mail.ru

Аннотация. В статье проведен анализ накопления подвижной серы в почве города Атырау. Атырау расположен в западной части Республики Казахстан. Основным источником загрязнения Атырау является Атырауский нефтеперерабатывающий завод. Повышенное содержание сероводорода в воздухе предполагает анализ накопления серы в почве, а также установления взаимосвязи с поступающим сероводородом из воздуха. Содержание подвижной серы в почве определяли фотометрическим методом в ТОО «Аналитическая лаборатория по охране окружающей среды». Накопления серы в почве зафиксированы на пунктах наблюдений, расположенных возле Атырауского нефтеперерабатывающего завода, например в пунктах наблюдения Химпоселок, Мирный, Пропарка. В пунктах наблюдения, расположенных в населенных пунктах, такой закономерности не отмечается. На пункте ПНЗ № 1 в почве наблюдается повышенное содержание серы ввиду близкого расположения к пруду-испарителю «Квадрат».

Ключевые слова: город Атырау, подвижная сера в почве, Атырауский нефтеперерабатывающий завод, накопление, пункты наблюдения

Для цитирования: Рыскалиева Д.К., Есенаманова М.С., Сырлыбеккызы С., Сангаджиева Л.Х. Анализ накопления подвижной серы в почве города Атырау // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 96–102.

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

Original article

ANALYSIS OF THE ACCUMULATION OF MOBILE SULFUR IN THE SOIL OF ATYRAU

Damilya K. Ryskaliyeva¹, Mansiya S. Yessenamanova², Samal Syrlybekkyzy³, Ludmila H. Sangadzhieva⁴

^{1, 3} Yesenov Caspian University of Technology and Engineering, Aktau, Republic of Kazakhstan

² Dosmukhamedov Atyrau University, Atyrau, Republic of Kazakhstan

⁴ Gorodovikov Kalmyk State University, Elista, Republic of Kalmykia, Russia

¹damilya03@gmail.com

²mansiya.73@mail.ru

³samal.syrlybekkyzy@yu.edu.kz

⁴chalga_ls@mail.ru

© Рыскалиева Д.К., Есенаманова М.С., Сырлыбеккызы С., Сангаджиева Л.Х., 2023

Abstract. The article analyzes the accumulation of mobile sulfur in the soil of the city of Atyrau. Atyrau city is located in the western part of the Republic of Kazakhstan. The main source of pollution of the city of Atyrau is the Atyrau Oil Refinery. The increased content of hydrogen sulfide in the air involves an analysis of the accumulation of sulfur in the soil, as well as establishing a relationship with the incoming hydrogen sulfide from the air. The content of mobile sulfur in the soil was determined by photometric method in the Testing Laboratory of Analytical Laboratory for Environmental Protection LLP. Accumulations of sulfur in the soil were recorded at observation points located near the Atyrau oil refinery, for example, at the observation point of Khimposelok, Mirny, Proparka. There is no such pattern in observation points located in populated areas. At the point of PNZ 1, an increased sulfur content is observed in the soil due to its close location to the Kvadrat evaporator pond.

Keywords: Atyrau, mobile sulfur in soil, Atyrau Oil Refinery, accumulation, observation points

For citation: Ryskalieva D.K., Yessenamanova M.S., Syrlybekkyzy S., Sangadzhieva L.H. Analysis of the Accumulation of Mobile Sulfur in the Soil of Atyrau *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):96-102. (In Russ.).

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

Земная кора содержит около 0,06 % серы, а общий запас элемента в почве определяется почвообразующими породами и содержанием в них органического вещества. 70–90 % серы из ее валовых запасов связано с органическим веществом почвы. Сера является распространенным элементом в окружающей среде и незаменима для растений, ее присутствие в почве естественно [1, 2]. Как правило, дефицит серы в почве – более распространенная проблема, чем ее избыток. Однако при выбросах серы техногенного и антропогенного происхождения в большом количестве может проявляться её токсичность. Чрезмерные концентрации оказывают негативное воздействие на растения, повреждая их корневую систему, листву, прореживая кроны, деформируя деревья и замедляя рост. В экосистемах, затронутых повышенным отложением серы, снижается микробная активность, за которой следуют нарушения биогеохимических циклов и минерального питания.

Источником серы является поступление сульфатов и серной кислоты в почву естественного и техногенного происхождения с атмосферными осадками. Оксиды серы попадают в атмосферу с продуктами сгорания различных видов серосодержащего топлива. Кроме того, важны и природные источники серы: вулканические выбросы, эманации из болотистых почв и т.д. Все эти источники ежегодно выбрасывают в атмосферу около 200 млн т серы [3, 4].

Некоторые соединения серы являются загрязнителями природной среды. К наиболее опасным относятся диоксид серы и сероводород. Установлено, что способность растений усваивать серу из атмосферы напрямую зависит от уровня питания корней. Сероводород также может выделяться из промышленных источников, таких как нефтеперерабатывающие заводы, заводы по производству природного газа, бумажные фабрики, заводы по переработке навоза, очистные сооружения сточных вод и кожевенные заводы.

В последние годы в городе Атырау, где расположен Атырауский нефтеперерабатывающий завод, содержание сероводорода в воздухе превышает предельно допустимые концентрации (ПДК), возникает необходимость в установлении взаимосвязи между накоплением серы в почве и поступающим из воздуха сероводородом [5, 6]. Атырауский нефтеперерабатывающий завод расположен в непосредственной близости от жилого района – примерно в 450 м к западу и в 730 м к северо-западу.

РГП «Казгидромет» является единственным юридически ответственным органом, который проводит круглосуточный мониторинг, т.е. наблюдает, анализирует, прогнозирует и предупреждает о поведении природы в различных средах, а именно в воздухе, воде и почве. Вся информация заносится на карту с указанием точек мониторинга загрязнения воздуха и доступна в режиме настоящего времени в приложении Air KZ. Мониторинг состояния атмосферного воздуха по г. Атырау ведется на 15 стационарных постах [5]. На карте (рис. 1) показаны данные посты. Согласно Приказу министра здравоохранения РК от 2 августа 2022 г. [7], максимальная разовая величина ПДК сероводорода в атмосферном воздухе – 0,008 мг/м³, или 8 мкг/м³. В случае превышения ПДК сероводорода в атмосферном воздухе приложение Air KZ показывает красный знак, т.е. очень высокий уровень концентрации.

Все пункты наблюдения расположены на территории основных микрорайонов города, где проживает городское население, и территории вблизи нефтеперерабатывающего завода, что позволяет определить влияние завода и бассейна сточных вод на содержание сероводорода в воздухе и накопление серы в почве (таблица).

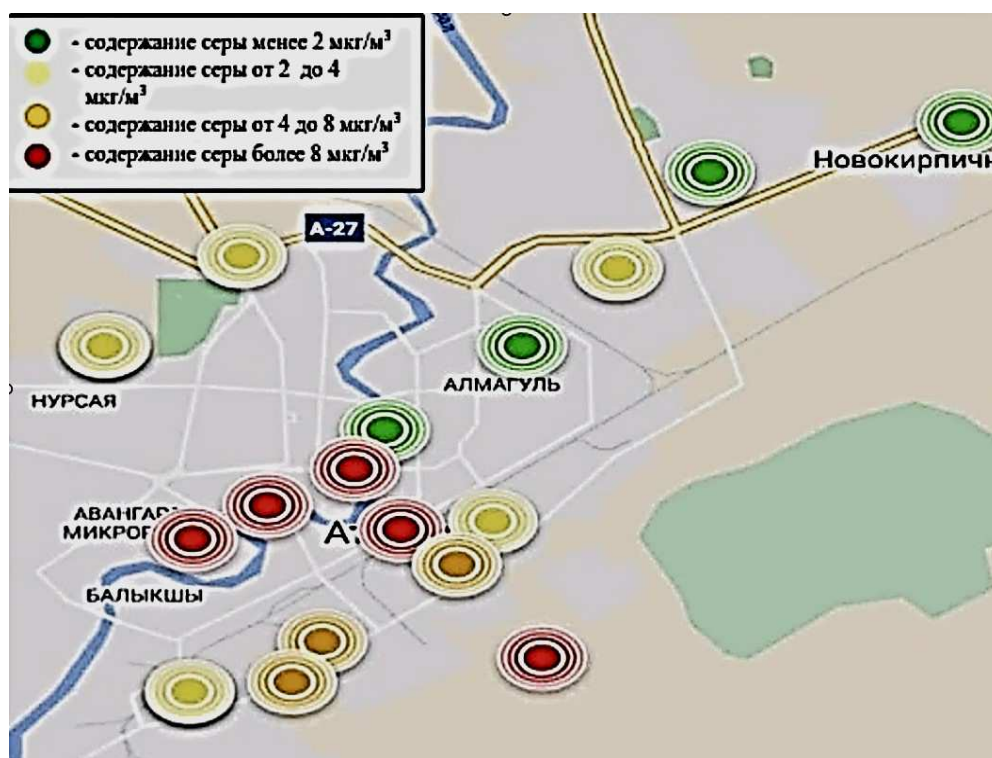


Рис. 1. Картограмма содержания серы в атмосфере города Атырау
 / Fig. 1. Cartogram of sulfur content in the atmosphere of the city of Atyrau

Расположение пункта наблюдения за состоянием атмосферного воздуха в городе Атырау, Республика Казахстан / Location of the atmospheric air monitoring point, Atyrau, Republic of Kazakhstan

Название пункта	Адрес точки	Расположение
Пропарка АНПЗ (Атырауский нефтеперерабатывающий завод)	Атырау, Пропарка АНПЗ	47.0726660, 51.9508610
Химпоселок АНПЗ	Атырау, Химпоселок АНПЗ	47.0887220, 51.9352780
Мирный АНПЗ	Атырау, Мирный АНПЗ	47.0754720, 51.9107500
Перетаска АНПЗ	Атырау, Перетаска АНПЗ	47.0685280, 51.9052210
ПНЗ № 1 (пункт наблюдения за загрязнением) (ручная точка)	Атырау, микрорайон Самал, ул. А. Кекильбаева, 15	47.1261210, 51.8708850
ПНЗ № 5 (ручной пункт)	Атырау, Курсай, ул. Карабау, 12	47.0668460, 51.8864240
ПНЗ № 6 (ручной пункт)	Атырау, микрорайон Жулдыз, 6-я улица, 29	47.1558350, 51.9814530
ПНЗ NCOC № 103 («Норт Каспиан Оперейтинг Компани»)	Атырау, Шагала	47.1117740, 51.9221670
ПНЗ NCOC № 108	Атырау, ТКА	47.1645230, 52.0275220
ПНЗ NCOC № 109	Атырау, Восток	47.0947250, 51.9250130
ПНЗ NCOC № 110	Атырау, Привокзальный	47.1261730, 51.9472360
ПНЗ NCOC № 111	Атырау, Жилгородок	47.0988520, 51.9006170
ПНЗ NCOC № 112	Атырау, Акимат	47.1050630, 51.9164730
ПНЗ NCOC № 113	Атырау, Авангард	47.0930470, 51.8869910
ПНЗ NCOC № 114	Атырау, Загородная	47.1415560, 51.8959480

На рис. 2 представлен сравнительный анализ 8 пунктов по показателям за два года (лето – весна 2020–2021 и 2021–2022 гг.), где отмечались наиболее повышенные показатели по содержанию сероводорода в воздухе.

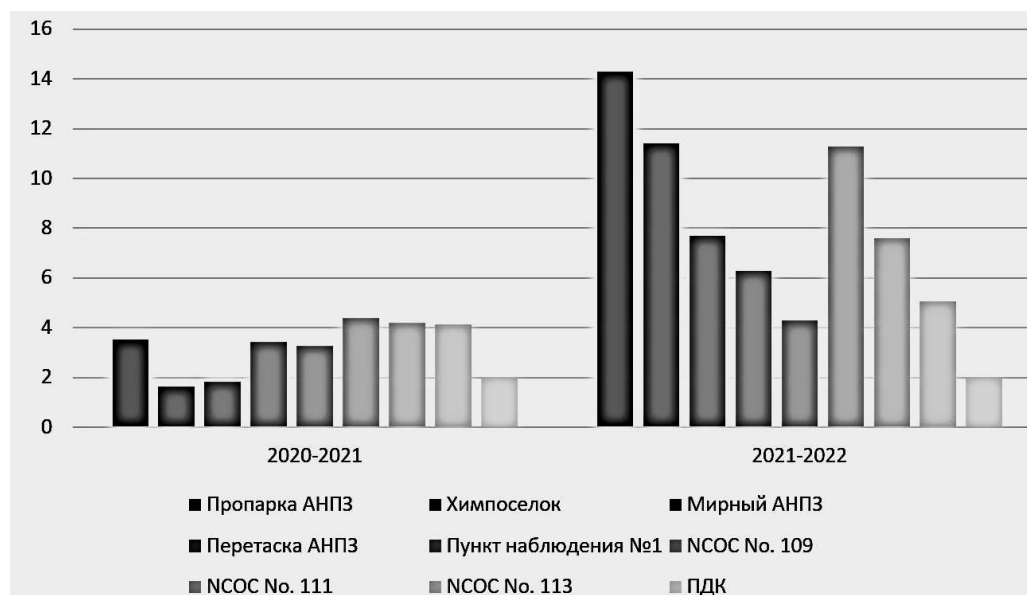


Рис. 2. Динамика содержания сероводорода в воздухе города Атырау
/ Fig. 2. Dynamics of hydrogen sulfide content in the air of Atyrau

Как видно из рис. 2, в большинстве наблюдаемых пунктов в 2021–2022 гг. содержание сероводорода было значительно выше, чем в предыдущий период.

Произошло резкое увеличение максимальных значений сероводорода в точке Пропарка АНПЗ (7,15 ПДК – в три раза больше, чем в прошлом году). Химпоселок АНПЗ и ПНЗ NCOC № 109 испытали аналогичный уровень загрязнения H_2S (около 5,7 ПДК). В пункте Мирный АНПЗ уровень сероводорода значительно вырос – в 3,8 раза. Такая же ситуация имела место в пункте ПНЗ NCOC № 111 – максимальное значение газа достигло 7,6 мг/м³. В пунктах Перетаска АНПЗ, ПНЗ № 1 и ПНЗ NCOC № 113 значения сероводорода изменились меньше по сравнению с предыдущим годом.

В целях установления взаимосвязи между показателями сероводорода в атмосферном воздухе и количеством подвижной серы в почве в осенний период 2021 г. и весенний период 2022 г. было проведено исследование содержания подвижной серы в почве на основных 15 наблюдательных пунктах города Атырау [8].

Для анализа было взято содержание подвижной серы на поверхности (0 см) и на глубине 50 см, где накопление серы может повлиять на корневую систему растений. Содержание подвижной серы в почве в 15 точках наблюдения проводилось в соответствии с ГОСТ 26490-85 в ТОО «Аналитическая лаборатория по охране окружающей среды» [9]. Содержание серы в почве определяли фотометрическим методом.

Согласно [10], ПДК элементарной серы в почве составляют 160 мг/кг. По графику (рис. 3а), содержание подвижной серы на поверхности почвы превышает нормы в районах, близлежащих к Атыраускому нефтеперерабатывающему заводу (АНПЗ). Так, в 2021 г. содержание серы в точках Химпоселок, Мирный АНПЗ и Перетаска варьировалось в пределах 600–700 мг/кг, что в 4 раза превышает ПДК.

Точка ПНЗ № 1 находится рядом с прудом-накопителем производственных сбросов «Квадрат», что, вероятно, повлияло на высокое содержание серы в почве – почти 800 мг/кг, или 5 ПДК. В остальных точках концентрация серы не превышала норму. Весной 2022 г. максимальное содержание серы на поверхности почвы достигло более 900 мг/кг в наблюдательных пунктах Химпоселок и Мирный АНПЗ. Также повышенная концентрация серы наблюдалась в точках Пропарка АНПЗ и NCOC № 109 – почти 700 мг/кг. Превышения содержания серы весной возможны вследствие её накопления снегом, по мере таяния снега наблюдается сезонное превышение серы

и в почве. Примечательно, что в 2021 г. превышения в данных пунктах не были зафиксированы. Следует также отметить, что содержание серы в точках Перетаска и ПНЗ № 1 уменьшилось на 300 мг/кг. В остальных жилых районах превышения подвижной серы на поверхности почвы не наблюдались.

На рис. 3 б показаны результаты исследования содержания подвижной серы на глубине почвы за 2021–2022 гг. Осенью 2021 г. содержание серы в почве составило 900 мг/кг (5,6 ПДК) в точках Мирный АНПЗ и ПНЗ № 1.

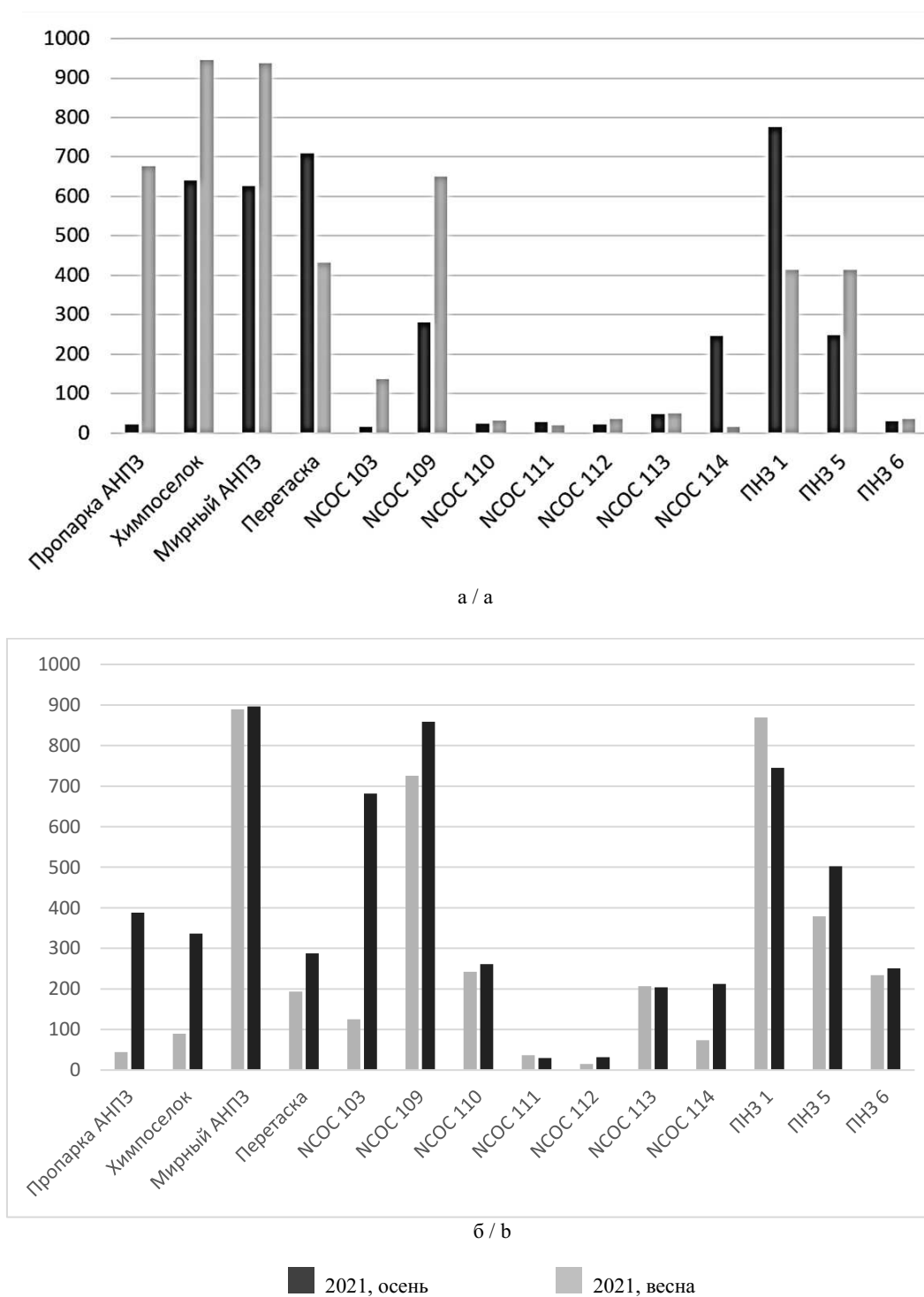


Рис. 3. Динамика содержания подвижной серы на поверхности почвы (а) и в почве на глубине 50 см (б)
 / Fig. 3. Dynamics of mobile sulfur content on the soil surface (a) and in the soil at a depth of 50 cm (b)

В точке НСОС № 109 превышение достигло 700 мг/кг, или чуть больше 4 ПДК. Весной 2022 г. наряду с вышеназванными точками было замечено превышение серы в точке НСОС № 103, которая находится в жилом районе центра города Атырау. Концентрация серы увеличилась почти на всех наблюдательных пунктах по сравнению с осенью 2021 г., что свидетельствует о накоплении подвижной серы в глубине почвы г. Атырау.

В заключение можно предположить, что превышение сероводорода в атмосферном воздухе г. Атырау, согласно динамике содержания сероводорода в атмосфере, влияет на содержание подвижной серы в почве, как на поверхности, так и в глубине. Наблюдательные точки в районе Атырауского нефтеперерабатывающего завода, т.е. Пропарка, Химпоселок, Мирный АНПЗ и Перетаска, показали тенденцию к повышенной концентрации серы по сравнению с другими постами. Вместе с тем наблюдается накопление подвижной серы в глубине почвы также в районе АНПЗ и ПНЗ № 1. В дальнейшем необходимо продолжить наблюдения за содержанием сероводорода в атмосферном воздухе и подвижной серы в почве, а также оценить влияние повышенного содержания серы на экосистемы города Атырау.

Список источников

1. Bern C.R., Townsend A.R. Accumulation of atmospheric sulfur in some Costa Rican soils // *JGR Biogeosciences*. 2008. Vol. 113: G03001. Doi: 10.1029/2008JG000692.
2. Sangadzhieva L.Kh., Davaeva Tz.D., Sangadzhieva O.S., Tzhombueva B.V., Yessenamanova M.S. Heavy metals in the Soil of Kalmykia Arid Territories // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 350. P. 012045, <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/350/1>.
3. Lukin S.V., Zhukov D.V. Ecological Assessment of Sulfur Content in Agroecosystems of the Central Black Earth Region of Russia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 937. Doi: 10.1088/1755-1315/937/2/022043.
4. Likus-Ciešlik J., Pietrzykowski M., Chodak M. Chemistry of Sulfur-Contaminated Soil Substrate from a Former Frasch Extraction Method Sulfur Mine Leachate with Various Forms of Litter in a Controlled Experiment // *Water Air Soil Pollut.* 2018. Vol. 229(3). P. 71. Doi: 10.1007/s11270-018-3716-2.
5. Yessenamanova M., Yessenamanova Zh., Tlepbergenova A., Batyrbayeva G. Analysis of the content of hydrogen sulfide in the air of the city of Atyrau // *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2021. Vol. 16 (3). P. 479–483. Doi: 10.18280/ijspd.160308.
6. Yessenamanova M.S., Tekeyeva A.A., Yessenamanova Zh.S., Tlepbergenova A.E. Assessment of the impact of indicator air pollutants in Atyrau city on public health // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 548(6). P. 062018. Doi: 10.1088/1755-1315/548/6/062018.
7. Об утверждении Гигиенических нормативов к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, на территориях промышленных организаций : приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 г. № ҚР ДСМ-70. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029011> (дата обращения: 11.02.2023).
8. Ежемесячный информационный бюллетень о состоянии окружающей среды / РГП «Казгидромет», 2022. № 27.
9. ГОСТ 26490-85. Почвы. Определение подвижной серы по методу ЦИНАО. М., 1985.
10. Об утверждении Гигиенических нормативов к безопасности среды обитания : приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 21 апреля 2021 г. № ҚР ДСМ-32. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100022595> (дата обращения: 11.02.2023).

References

1. Bern C.R., Townsend A.R. Accumulation of atmospheric sulfur in some Costa Rican soils. *JGR Biogeosciences*. 2008;113:G03001, doi: 10.1029/2008JG000692.
2. Sangadzhieva L.Kh., Davaeva Tz.D., Sangadzhieva O.S., Tzhombueva B.V., Yessenamanova M.S. Heavy metals in the Soil of Kalmykia Arid Territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;350:012045, <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/350/1>.
3. Lukin S.V., Zhukov D.V. Ecological Assessment of Sulfur Content in Agroecosystems of the Central Black Earth Region of Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;937, doi: 10.1088/1755-1315/937/2/022043.
4. Likus-Ciešlik J., Pietrzykowski M., Chodak M. Chemistry of Sulfur-Contaminated Soil Substrate from a Former Frasch Extraction Method Sulfur Mine Leachate with Various Forms of Litter in a Controlled Experiment. *Water Air Soil Pollut.* 2018;229(3):71, doi: 10.1007/s11270-018-3716-2. PMID: 29497216; PMCID: PMC5816133.

5. Yessenamanova M., Yessenamanova Zh., Tlepbergenova A., Batyrbayeva G. Analysis of the content of hydrogen sulfide in the air of the city of Atyrau. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2021;16(3):479-483, doi: 10.18280/ijstdp.160308.

6. Yessenamanova M.S., Tekeyeva A.A., Yessenamanova Zh.S., Tlepbergenova A.E. Assessment of the impact of indicator air pollutants in Atyrau city on public health. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;548(6):062018, doi: 10.1088/1755-1315/548/6/062018.

7. *On approval of Hygienic standards for atmospheric air in urban and rural settlements, on the territories of industrial organizations*: Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan dated August 2, 2022 No. KR DSM-70. Available from: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029011> [Accessed 11th February 2023]. (In Russ.).

8. *Monthly newsletter on the state of the environment*. RSE Kazhydromet, 2022:(27). (In Kazakh).

9. *GOST 26490-85. Soils. Determination of mobile sulfur by CINAO method*. Moscow, 1985. (In Russ.).

10. *On the approval of Hygienic standards for the safety of the habitat*: Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan dated April 21, 2021 No. KR DSM-32. Available from: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100022595> [Accessed 11th February 2023]. (In Russ.).

Информация об авторах

Д.К. Рыскалиева – докторант.

М.С. Есенаманова – доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой экологии.

С. Сырлыбеккызы – ассоциированный профессор PhD.

Л.Х. Сангаджиева – доктор биологических наук, профессор, кафедра химии.

Information about the authors

D.K. Ryskaliyeva - Doctoral Student.

M.S. Yessenamanova - Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the Department of Ecology.

S. Syrlybekkyzy - PhD Associate Professor.

L.H. Sangadzhiyeva - Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Chemistry.

*Статья поступила в редакцию 27.12.2022; одобрена после рецензирования 25.03.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 27.12.2022; approved after reviewing 25.03.2023; accepted for publication 19.05.2023.*

Научная статья

УДК 504.062:630*62

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-103-114

РЕКРЕАЦИОННОЕ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЕ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ АЗИИ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИИ)

Эрдэни Доржиевич Санжеев^{1✉}, Мунко Булатович Намдаков²

^{1, 2} Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия

¹esan@binm.ru✉

²namdakovmunko@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты исследования рекреационного использования лесов в Республике Бурятия (РБ). Дана сравнительная характеристика лесных ресурсов республики и России, подчеркнута высокая ценность ее лесов. Показана значимость рекреационного лесопользования среди других видов использования лесов в РБ. Проведен анализ динамики аренды участков лесного фонда в рекреационных целях, который показал сокращение числа арендаторов и уменьшение площади арендуемых участков. Выявлено, что это преимущественно обусловлено влиянием ограничительных мероприятий вследствие пандемии коронавируса. Установлено, что в общей структуре арендаторов большую часть составляют частные предприятия. Государственных предприятий и организаций среди арендаторов значительно меньше, но их число остается стабильным. Сравнительный анализ позволяет утверждать, что более 60,0 % арендаторов лесного фонда в рекреационных целях находятся в границах четырех районов РБ, входящих в центральную экологическую зону Байкальской природной территории. Проведенный анализ использования лесных земель в рекреационных целях позволяет утверждать, что они в основном используются для строительства и эксплуатации коллективных средств размещения туристов. Обозначены различия в характере использования аренды лесных земель в рекреационных целях и по договорам постоянного (бессрочного) использования. Высокая доля арендаторов земель лесного фонда в рекреационных целях требует проведения мониторинговых наблюдений за уровнем рекреационных нагрузок. Несогласованность действий государственных органов, несовершенство существующей законодательной и нормативно-правовой базы ставит под угрозу состояние лесных ресурсов в республике вследствие стихийного развития туризма. Необходимо дальнейшее изучение существующих проблем рекреационного лесопользования и разработка комплекса мер по его рационализации.

Ключевые слова: рекреационное лесопользование, туризм, центральная экологическая зона, Байкальская природная территория, рекреационные нагрузки, лесной фонд, арендатор

Благодарности: исследование проведено в рамках государственного задания БИП СО РАН № АААА-А21-121011590039-6 (мнемокод 0273-2021-0003).

Для цитирования: Санжеев Э.Д., Намдаков М.Б. Рекреационное лесопользование в регионах Северной Азии (на примере Республики Бурятия) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 103–114.

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

Original article

RECREATIONAL FOREST USE IN THE REGIONS OF NORTHERN ASIA (FOR EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF BURYATIA)

Erdeni D. Sanzheev^{1✉}, **Munko B. Namdakov**²

^{1,2} Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia

¹esan@binm.ru✉

²namdakovmunko@gmail.com

Abstract. The results of a study of the recreational use of forests in the Republic of Buryatia are presented in the article. A comparative description of the forest resources of the Republic and Russia is given, the high value of its forests is emphasized. The importance of recreational forest use among other types of forest use in the Republic of Buryatia is shown. The analysis of the dynamics of the forest fund plots lease for recreational purposes, which showed a decrease in the number of tenants and in the area of leased plots was made in the article. It was revealed that this is mainly due to the influence of restrictive measures due to the coronavirus pandemic. It has been established that in the general structure of tenants the majority are private enterprises. There are significantly fewer state-owned enterprises and organizations among tenants, but their number remains stable. A comparative analysis allows us to state that more than 60.0 % of forest fund tenants for recreational purposes are located within the boundaries of four districts of the Republic of Buryatia, which are part of the central ecological zone of the Baikal natural territory. The analysis of the use of the forest lands for recreational purposes suggests that they are mainly used for the construction and operation of collective accommodation facilities for tourists. Differences in the nature of the use are highlighted of the forest land lease for recreational purposes and under contracts of permanent (perpetual) use. A high proportion of tenants of forest land for recreational purposes requires monitoring of the level of recreational loads. The inconsistency of the actions of state bodies, the imperfection of the existing legislative and regulatory framework threatens the state of forest resources in the republic due to the spontaneous development of tourism. It is necessary to further study the existing problems of recreational forest use and develop a set of measures for its rationalization.

Keywords: recreational forest use, tourism, central ecological zone, Baikal natural territory, recreational loads, forest fund, tenant

Acknowledgments: the study was carried out within the framework of the state assignment of the BINM SB RAS No. AAAA-A21-121011590039-6 (mnemonic code 0273-2021-0003).

For citation: Sanzheev E.D., Namdakov M.B. Recreational Forest Use in the Regions of Northern Asia (for example of the Republic of Buryatia). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):103-114. (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

Регионы Северной Азии обладают обширными запасами лесных ресурсов, практически неза тронутых хозяйственной деятельностью человека. Интенсивное лесопользование ведется на сравнительно небольших участках и связано с множеством экологических проблем. При правильной организации рекреационное лесопользование (РЛ) в отличие от других видов использования лесных ресурсов несет минимальную нагрузку на лесные экосистемы и обладает значительным эколого-экономическим эффектом. Однако при стихийном рекреационном освоении лесных участков оно становится мощным дестабилизирующим фактором. Особенно это касается тех регионов Северной Азии, в которых туризм является приоритетной отраслью экономики. К числу таких регионов относится Республика Бурятия (РБ). Поэтому проблема рационального использования лесных ресурсов республики в рекреационных целях является своевременной и актуальной.

Материалы и методы исследования

По вопросам РЛ имеется достаточное количество публикаций. В фундаментальных работах большое внимание уделяется экономическим основам его организации. Рассмотрены научные подходы к исследованию РЛ [1], изложены его концептуальные основы [2], представлен авторский подход по экономической организации парклесхозов Санкт-Петербурга [3].

В публикациях последних лет по РЛ проведены оценки рекреационного потенциала лесов г. Казани [4], эколого-экономической эффективности РЛ на примере Ленинградской области [5], лесных рекреационных ресурсов Республики Башкортостан [6], рекреационного потенциала горных лесных территорий на юге Красноярского края [7]. Рассмотрены особенности РЛ в Московском столичном регионе [8]. Обзор работ по данной тематике свидетельствует о значимости рекреационного природопользования для экономики регионов и необходимости его исследования.

В работе [9] на примере РБ изучены правовые основы, цели и задачи организации рекреационной деятельности на землях лесного фонда, обоснованы географические предпосылки развития РЛ. В [10] проанализированы особенности лесопользования в центральной экологической зоне Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ). Возможный объем рекреационных экосистемных услуг в лесах РБ оценивается в 300,0 тыс. туристов в год [11]. Можно отметить сравнительно небольшое число работ, посвященных РЛ в РБ и сопредельных регионах.

В процессе выполнения работ использованы данные и материалы Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз), Республиканского агентства лесного хозяйства (РАЛХ), Министерства лесного комплекса Иркутской области, Министерства туризма РБ, бюджетного учреждения РБ «Природопользование и охрана окружающей среды РБ» (БУ «Бурприрода»), фондовые материалы Байкальского института природопользования СО РАН, законодательные и нормативно-правовые документы, монографии, статьи и прочие публикации по теме исследования.

В ходе проведения исследований применялись системный, комплексный, аналитический, типологический подходы, статистический, сравнительно-географический, картографический методы, ГИС-технологии.

Обсуждение результатов

В настоящее время рекреационное освоение лесов в РБ обусловлено особенностями хозяйственного освоения территории и растущим потоком туристов на оз. Байкал. В данных условиях становятся актуальными исследования в области влияния РЛ на природные комплексы. Необходима разработка мер по регулированию рекреационных нагрузок с целью предотвращения деградации прибрежных лесных экосистем оз. Байкал.

Республика Бурятия обладает значительными запасами лесных ресурсов (табл. 1). Лесистость территории и удельный вес защитных лесов выше аналогичного показателя в целом по стране почти в 1,4 раза. Площадь защитных лесов в отличие от аналогичных среднероссийских показателей составляет существенную долю в лесных землях. Это указывает на их высокую ценность и необходимость охраны и рационального использования.

Использование лесов для ведения рекреационной деятельности осуществляется в соответствии со статьей 41 Лесного кодекса РФ и Правилами использования лесов для осуществления рекреационной деятельности, утвержденными приказом Рослесхоза от 21.02.2012 г. № 62. При осуществлении рекреационной деятельности в лесах допускается возведение временных построек на лесных участках и осуществление их благоустройства [12].

Наибольший интерес для ведения рекреационной деятельности представляют лесные участки, которые расположены вблизи оз. Байкал в ЦЭЗ БПТ РБ. В этой зоне – пять муниципальных образований, в том числе Баргузинский, Кабанский, Прибайкальский, Северо-Байкальский районы, г. Северобайкальск. По информации Министерства туризма РБ, туристские потоки в республику растут, и их большая часть приходится на указанные районы республики.

По данным РАЛХ по состоянию на 01.02.2016 г., в ЦЭЗ БПТ Бурятии насчитывалось 97 предприятий и организаций, арендующих лесные земли в рекреационных целях (47,6 %). В соседнем регионе (Иркутская область) эта цифра была на порядок выше [10].

Таблица 1 / Table 1

**Характеристика лесных ресурсов РБ и Российской Федерации (РФ) по состоянию на 01.07.2021 г.*
/ Characteristics of the forest resources of the Republic of Buryatia and the Russian Federation as of July 1, 2021**

Показатель	РБ	РФ
Общая площадь территории, тыс. га	35133,41	1712519,1
Лесистость территории, %	63,7	46,4
Общая площадь земель, занятых лесами, тыс. га	27043,7	1146255,2
В том числе:		
Лесные земли	21547,1	863888,7
Земли, покрытые лесной растительностью	20581,2	766433,1
Защитные леса	9398,7	284901,0
В том числе:		
Леса, расположенные на особо охраняемых природных территориях	37,4	2810,0
Леса, расположенные в водоохранных зонах	2969,2	18524,0
Леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов	372,2	22084,8
Ценные леса	6019,9	241481,1
Эксплуатационные леса	9427,6	593823,5
Резервные леса	8181,5	266599,7
Общий запас древесины, млн м ³	2243,17	82500,07

* – составлено с использованием данных Рослесхоза [13, 14].

Количество арендаторов с 2016 г. выросло на 10,4 % и по состоянию на 01.06.2018 г. составило 107, в том числе 14 по договорам постоянного (бессрочного) пользования [15]. По данным на 05.07.2022 г. этот показатель сократился до 83 арендаторов, в том числе 13 по договорам постоянного (бессрочного) пользования (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Распределение организаций, арендующих земли лесного фонда в рекреационных целях, по количеству и площади участков в ЦЭЗ БПТ РБ в 2022 г.* / Distribution of tenants of forest fund lands for recreational purposes by the number and area of plots in the CEZ BNT of the Republic of Buryatia in 2022

Район	Лесничество	Распределение арендаторов по договорам аренды (числитель) и постоянного пользования (знаменатель)			Общая площадь арендуемых участков, га
		Количество арендаторов	Количество участков	Площадь участков, га	
Баргузинский	Усть-Баргузинское	<u>10</u>	<u>16</u>	<u>41,481</u>	117,161
		3	3	75,680	
Кабанский	Бабушкинское	<u>13</u>	<u>14</u>	<u>67,111</u>	68,294
	1	3	1,183		
	Кабанское	<u>11</u>	<u>12</u>	<u>28,890</u>	268,290
	2	5	239,400		
Прибайкальский	Кикинское	<u>5</u>	<u>5</u>	<u>6,620</u>	7,560
	1	1	0,940		
	Байкальское	<u>13</u>	<u>13</u>	<u>20,890</u>	761,770
	4	4	740,880		
Северо-Байкальский	Северо-Байкальское	<u>18</u>	<u>19</u>	<u>10,705</u>	25,365
		2	2	14,660	
Итого		<u>70</u>	<u>79</u>	<u>175,697</u>	1248,440
		13	18	1072,743	

* – составлена авторами с использованием данных РАЛХ.

Сокращение в последние годы числа предприятий и организаций, арендующих земли лесного фонда в рекреационных целях, по нашему мнению, обусловлено влиянием пандемии коронавируса. Уменьшение объема туристических потоков вследствие пандемии привело к кризисным явлениям в туристической отрасли, которые сопровождались приостановлением деятельности и закрытием отдельных туристических предприятий, в том числе в сфере РЛ.

Анализ структуры предприятий и организаций, арендующих лесные земли в рекреационных целях, позволил выявить их динамику за анализируемый период и особенности распределения по организационно-правовым формам. Особый интерес представляет распределение арендаторов по формам собственности в ЦЭЗ БПТ РБ (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Распределение арендаторов земель лесного фонда в рекреационных целях по формам собственности в ЦЭЗ БПТ РБ в 2022 г.* / Distribution of tenants of forest fund lands for recreational purposes by type of ownership in the CEZ BNT of the Republic of Buryatia in 2022

Район	Лесничество	Ведомственная принадлежность						Проф-союзная	Всего
		Государственная	Частная						
			ПАО	ОАО	ООО	ИП	Прочие		
Баргузинский	Усть-Баргузинское	3	–	–	6	4	–	–	13
Кабанский	Бабушкинское	1	–	–	5	6	2	–	14
	Кабанское	2	1	2	4	4	–	–	13
Прибайкальский	Кикинское	1	–	–	–	5	–	–	6
	Байкальское	4	–	–	8	2	2	1	17
Северо-Байкальский	Северо-Байкальское	2	–	1	11	4	2	–	20
Итого		13	1	3	34	25	6	1	83

*– составлена авторами с использованием данных РАЛХ.

Среди арендаторов выделяются 13 государственных организаций и одна профсоюзная. В этой категории с 2016 г. существенных изменений не произошло. Количество частных арендаторов сократилось более чем на 1/3 – с 92 до 69. Изменилась и их структура, большую часть из них (85,5 %) составляют общества с ограниченной ответственностью (ООО) и индивидуальные предприниматели (ИП). Кроме того, в перечне арендаторов появились два физических лица. Прекратили аренду лесных участков две семейно-родовые эвенкийские общины.

В районах республики, которые входят в ЦЭЗ БПТ, общая площадь арендуемых земель лесного фонда в рекреационных целях составляет 1248,440 га. Большая часть лесных земель арендована по договорам постоянного (бессрочного) пользования – 1072,743 га, по договорам аренды – всего 175,697 га. Большинство арендаторов находится в Кабанском районе – 27. Однако в Прибайкальском районе площадь арендуемых земель составляет 60,2 % от общей площади арендуемых участков (751,33 га).

53 организации арендуют небольшие участки (≤ 1 га), 29 – до 5 га, 6 – до 10 га, 6 – от 10 до 55 га, 3 – свыше 55 га. Самым крупным арендатором было и остается БУ «Бурприрода», которое арендует 973,6 га, или 78,0 % от общей площади арендуемых земель. Один участок арендован в Прибайкальском районе общей площадью 737,8 га; четыре – в Кабанском, суммарной площадью 235,8 га. На этих участках располагается организованная в 2012 г. рекреационная местность регионального значения «Побережье Байкала».

Аналогичная ситуация складывается в Иркутской области. По сравнению с 2011 г. в ЦЭЗ БПТ «при увеличении числа договоров в сфере рекреационной деятельности (с 41 до 56 ед.) значительно сократилась площадь используемых земель лесного фонда (в 116 раз), что свидетельствует об ориентации лесопользователей на небольшие участки, в среднем до 1,5 га» [10]. По данным Министерства лесного комплекса Иркутской области по состоянию на 2022 г., количество договоров аренды сократилось в два раза и составило 28. Средняя площадь участков уменьшилась до 0,9 га [16].

Сравнение данных по РБ и Иркутской области показывает региональные различия в площадях арендуемых участков. С площадью до одного гектара участков в Бурятии достаточно много. Однако их средняя площадь значительно превышает аналогичные показатели по Иркутской области.

По нашему мнению, увеличение интереса со стороны предпринимателей к использованию земель лесного фонда в рекреационных целях в 2016 г. объясняется стремлением бизнеса удовлетворить растущий спрос на отдых у оз. Байкал. Небольшая площадь арендуемых участков объясняется желанием предпринимателей снизить затраты за счет сокращения арендной платы. На рынок аренды лесных земель в рекреационных целях оказывают сильное влияние социально-экономические процессы и природные факторы. В перспективе можно прогнозировать, что после падения рынок аренды снова пойдет в рост, поскольку сложившаяся геополитическая ситуация и закрытие государственных границ благоприятствуют развитию внутреннего туризма.

В других районах республики площадь арендуемых участков в лесном фонде в рекреационных целях – 2644,984 га. Арендаторами являются 43 организации различных правовых форм (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Количество арендаторов и площадь арендуемых земель лесного фонда в рекреационных целях по договорам аренды и по договорам постоянного (бессрочного) пользования в РБ* / The number of tenants and the area of leased lands of the forest fund for recreational purposes and under contracts of permanent (perpetual) use in the Republic of Buryatia

Арендуемые земли и форма договора	Количество арендаторов	Количество участков	Площадь арендуемых земель, га
ЦЭЗ БПТ в РБ, всего	83	97	1248,440
В том числе:			
по договорам аренды	70	79	175,697
по договорам бессрочного пользования	13	18	1072,743
Прочие районы РБ, всего	51	54	2644,984
В том числе:			
по договорам аренды	34	37	47,024
по договорам бессрочного пользования	17	17	2597,960
Итого	134	151	3893,424
В том числе:			
по договорам аренды	104	116	222,721
по договорам бессрочного пользования	30	35	3670,703

*– составлена авторами с использованием данных РАЛХ.

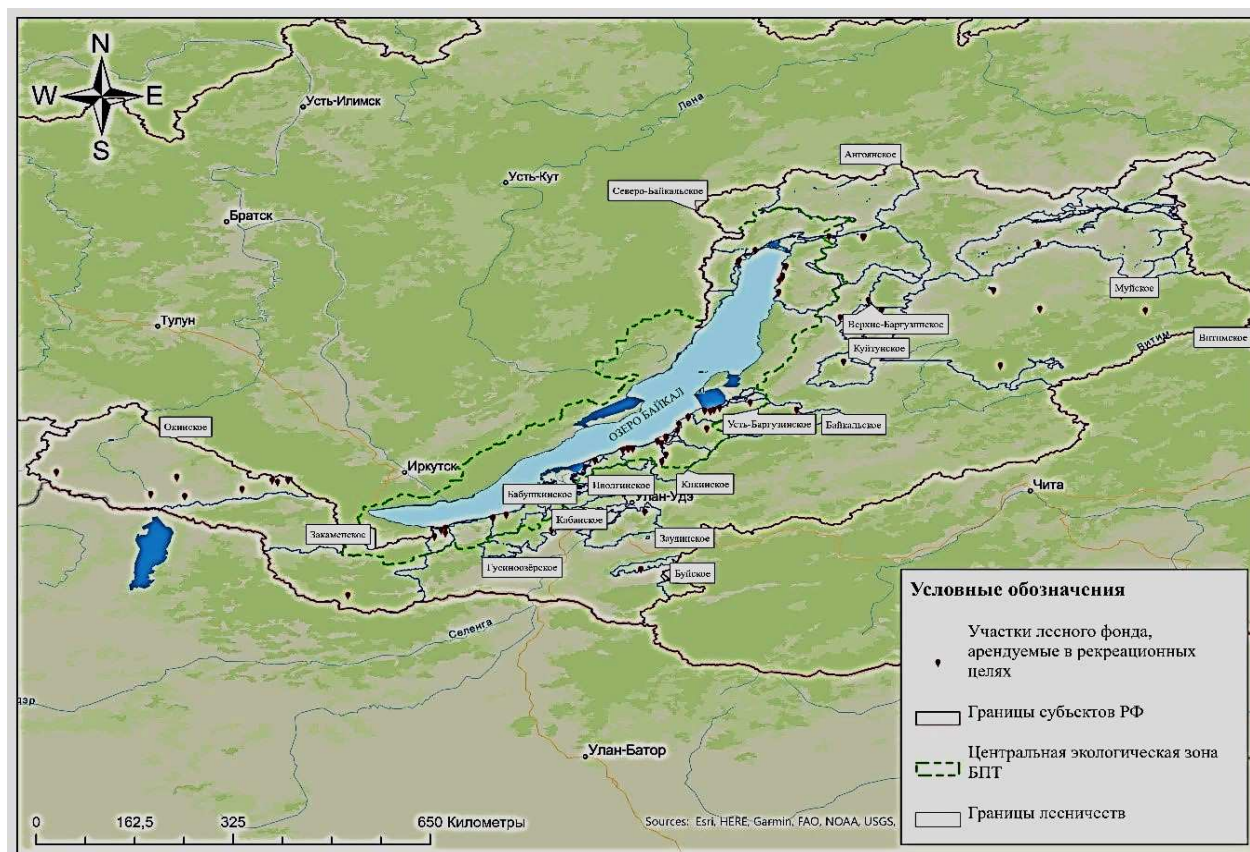
Из табл. 4 отчетливо видно, что большая часть РЛ сосредоточена на территории четырех районов республики, входящих в ЦЭЗ БПТ. На остальной ее территории количество арендаторов значительно меньше (рисунок). Причем по договорам постоянного (бессрочного) пользования арендаторы относятся исключительно к государственным организациям (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Распределение организаций, арендующих земли лесного фонда в рекреационных целях, по формам собственности в районах РБ, не входивших в ЦЭЗ БПТ в 2022 г.* / Distribution of tenants of forest fund lands for recreational purposes by type of ownership in the regions of the Republic of Buryatia that are not included in the BNT CEZ in 2022

Договор	Ведомственная принадлежность						Профсоюзная	Всего
	Государственная	Частная						
		ПАО	АО	ООО	ИП	Прочие		
аренды	–	–	2	9	21	2	–	34
постоянного (бессрочного) пользования	9	–	–	–	–	–	–	9
Итого	9	–	2	9	21	2	–	43

*– составлена авторами с использованием данных РАЛХ.



Распределение участков лесного фонда, арендуемых в рекреационных целях, по лесничествам РБ.
Составлено авторами / Distribution of forest fund plots leased for recreational purposes
by forest areas of the Republic of Buryatia. Compiled by the authors

В бессрочном пользовании арендаторов находится 2597,960 га земель лесного фонда за пределами ЦЭЗ БПТ. Из них 2059,08 га расположены в Окинском районе. На остальных восьмерых пользователей приходится всего 538,88 га лесных земель. Большая часть из них (85,9 %, 462,6 га) принадлежит одному арендатору и относится к территориям традиционного природопользования сойотов в Окинском районе.

На арендованных землях лесного фонда в ЦЭЗ БПТ запрещено строительство капитальных объектов [14]. Однако эти земли пользуются спросом для организации туристско-рекреационной деятельности. Приоритетным направлением их использования является строительство и эксплуатация коллективных средств размещения туристов (КСР). К ним относятся гостевые дома, базы отдыха, турбазы, гостиницы, дома охотника и рыболова, домики для туристов, стационары, туристско-рекреационные комплексы (ТРК), кемпинги и др.

Арендованные земли в ЦЭЗ БПТ РБ преимущественно использовались для строительства КСР (48,6 % от общего числа объектов). В основном они были введены в эксплуатацию до запрета на строительство капитальных объектов (табл. 6). К ним относятся базы, гостевые дома, базы отдыха, ТРК, кемпинги.

В прочих районах республики количество КСР составляет всего 25,3 % от общего числа объектов. Однако гостевых домов, гостиниц, турбаз, баз отдыха здесь немного, всего 9,7 % (табл. 6). В основном КСР представлены домами охотника и рыболова, домиками для туристов, стационарами. Их число в целом составляет 15,5 %. Эти средства размещения находятся, как правило, в тайге, вблизи рек и озер, вдали от автомобильных дорог. Превалирующее количество палаточных лагерей размещается на арендованных землях лесного фонда в ЦЭЗ БПТ РБ.

К объектам придорожного сервиса относятся придорожные кафе, реже рядом размещаются платные туалеты для туристов, есть магазины сувениров (табл. 6). На арендованном участке в местности Мамай в Кабанском районе оборудована горнолыжная трасса, которая привлекает большое количество туристов. В Тарбагатайском районе имеется единственная в своем роде в республике страусиная ферма, на которую организуются экскурсии.

Таблица 6 / Table 6

**Использование арендаторами земель лесного фонда в рекреационных целях
в ЦЭЗ БПТ РБ в 2022 г.^{1/} The use of forest land by tenants for recreational purposes
in the CEZ of the BNT, Republic of Buryatia, 2022**

Район РБ	Гостевой дом	База отдыха	Прочие КСР ²	Палаточный лагерь	Объекты придорожного сервиса	Прочие ³	Всего
Входящие в ЦЭЗ БПТ	22	17	11	14	4	1	69
Прочие	2	8	16	2	5	1	34
Итого	24	25	27	16	9	2	103

¹Составлена авторами с использованием данных РАЛХ и [17–22].

²В пункт «Прочие КСР» включены дом охотника и рыболова, домики для туристов, стационары, ТРК, кемпинги.

³В пункт «Прочие» включены горнолыжная трасса и страусиная ферма.

На арендованных землях по договорам постоянного (бессрочного) пользования находятся особо охраняемые природные территории (ООПТ). В ЦЭЗ БПТ РБ – рекреационная местность «Побережье Байкала» (табл. 7).

Таблица 7 / Table 7

**Использование арендуемых земель лесного фонда в рекреационных целях по договорам
постоянного (бессрочного) пользования в РБ^{1/} The use of leased lands of the forest fund
for recreational purposes under contracts for permanent (unlimited) use in the Republic of Buryatia**

Районы РБ	ООПТ	КСР ²	Прочие КСР ³	Палаточный лагерь	Лыжня	Горнолыжная база	Детские лагеря ⁴	Всего
Входящие в ЦЭЗ БПТ	2	6	-	4	2	-	-	14
Прочие	1	4	7	-	-	1	4	17
Итого	3	10	7	4	2	1	4	31

¹Составлена авторами с использованием данных РАЛХ и [17–22].

²В пункт «КСР» включены полевой волонтерский лагерь, эколого-туристический комплекс, базы отдыха, турбаза, пансионат.

³В пункт «Прочие КСР» входят дом охотника и рыболова, кордоны заповедника.

⁴В пункт «Детские лагеря» входят оздоровительные, спортивно-оздоровительные и спортивные лагеря.

На рекреационной местности «Побережье Байкала» оборудованы стоянки для туристов, установлены туалеты и мусорные контейнеры, организован вывоз отходов. В пункт «ООПТ» (табл. 7) также включена экологическая тропа «Путь к Байкалу», организованная Байкальским заповедником.

Коллективные средства размещения в ЦЭЗ БПТ РБ представлены базами отдыха, турбазами, пансионатом (табл. 7). Сюда также отнесены КСР Байкальского заповедника, в том числе полевой волонтерский лагерь (центральная усадьба заповедника) и эколого-туристический комплекс «Омулёвый». Здесь все палаточные лагеря размещены на побережье оз. Байкал. В Баргузинском районе имеются два лесных участка, на которых организована лыжня для тренировки детей, посещающих спортивную школу.

На территории прочих районов республики только в Окинском районе имеется одна ООПТ – это природный парк регионального значения «Шумак». Земли природного парка по договору постоянного (бессрочного) пользования находятся в ведении БУ «Бурприрода». На его территории имеются одноименная база отдыха и домики для отдыхающих.

В прочих районах республики на лесных землях в постоянном (бессрочном) пользовании есть базы отдыха, турбазы – лишь в Иволгинском и Окинском районах. К прочим КСР относятся два кордона заповедника, а также дома охотника и рыболова, расположенные в Окинском районе. В

Северо-Байкальском районе функционирует горнолыжная база. Детские лагеря, относящиеся к бюджетным учреждениям, находятся в Баунтовском, Тарбагатайском и Мухоршибирском районах.

В РБ сложился уклад РЛ, отличающийся своей спецификой. Его современная структура формировалась под влиянием стихийного рекреационного освоения побережья оз. Байкал и территории республики в советский период. На берегах озера было построено большинство КСР, имевших ведомственный характер. На минеральных источниках возводились местные здравницы. Хотя прошло достаточно много времени, тем не менее эти тенденции до сих пор определяют характер РЛ в республике.

Как показал анализ, за достаточно расплывчатой формулировкой «использование земель лесного фонда в рекреационных целях» скрываются разнообразные виды деятельности, которые имеют свои особенности воздействия на природные комплексы. В связи с подобным стихийным освоением лесных земель в рекреационных целях проявляется множество проблем. Так, остается открытым вопрос о регулировании рекреационных нагрузок на эти участки, поскольку в законодательстве и нормативно-правовой базе не определены их предельно допустимые нормативы. Отсутствует система мониторинга, позволяющая выявить негативные явления в природных комплексах под влиянием туристско-рекреационной деятельности. Поэтому при заключении договора аренды должны учитываться ландшафтные особенности территории, характер использования арендуемого участка лесного фонда и особенности планируемой туристско-рекреационной деятельности.

Немаловажная проблема, связанная со стихийным развитием туризма в лесном фонде, – лесные пожары [23]. На территории республики в летний период вводится особый противопожарный режим, который полностью запрещает гражданам посещение лесов, за исключением оборудованных мест отдыха, определяемых РАЛХ. Это позволило снизить риски возникновения пожаров в лесах по вине человека.

Согласно законодательству, заключение договоров аренды лесных участков и контроль за их исполнением находятся в ведении РАЛХ. Однако за развитие туризма, вопросы природоохранной деятельности предприятий туристической индустрии, обеспечение безопасности туристов и медицинское обслуживание, а также предоставление различных услуг туристам и др. отвечают различные государственные органы. Для правильной организации РЛ необходимо совершенствование механизма взаимодействия органов государственного управления.

Анализ действующей законодательной и нормативно-правовой базы показал, что практически отсутствовали нормативные документы, регулирующие РЛ. Однако в целях реализации ФЗ «Об охране озера Байкал» (1999) в 2018 г. БИП СО РАН были разработаны «Правила организации туризма и отдыха в ЦЭЗ БПТ в Республике Бурятия» [24]. Аналогичные правила для Иркутской области подготовлены Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. В данном документе определены особенности организации туризма и отдыха на землях лесного фонда, даны рекомендации по определению рекреационной нагрузки на лесных землях и ее регулированию. Несмотря на наличие подобных нормативных документов, остается много вопросов. Поэтому нормативно-правовая база нуждается в совершенствовании и разработке новых документов по регулированию рекреационного лесопользования.

Выводы

Несмотря на множество публикаций по РЛ, которые затрагивают различные аспекты его организации, управления, упорядочения, разработки научных основ, регулирования рекреационных нагрузок, вопросы его организации и регулирования остаются по-прежнему достаточно актуальными. Так, «...несмотря на отсутствие плановой системы рекреационного природопользования, оно продолжает развиваться в самостоятельной форме без какого-либо контроля и регламентации» [25].

РЛ затрагивает различные категории земель, на которых находятся леса, используемые в сфере рекреации и туризма. Режим эксплуатации этих земель является различным, как и круг лесопользователей, что требует разработки единых подходов к управлению РЛ на региональном уровне.

Сложившаяся ситуация в лесном комплексе не способствует рациональному использованию лесов в рекреационных целях. Особенно это актуально для регионов, обладающих значитель-

ными запасами лесных ресурсов. Уязвимость природной среды предъявляет повышенные экологические требования к ведению хозяйственной деятельности, в том числе туристско-рекреационной. Поэтому нужна согласованная работа различных государственных органов в вопросах упорядочивания использования лесных ресурсов в рекреационных целях. Необходимо совершенствование системы государственного управления и действующей законодательной и нормативно-правовой базы, регулирующей отношения в области РЛ. Это возможно при разработке и введении научно обоснованных нормативов рекреационной нагрузки, государственного экологического мониторинга туристско-рекреационной деятельности и др.

Список источников

1. *Тарасов А.И.* Экономика рекреационного лесопользования. М.: Агропромиздат, 1986. 176 с.
2. *Большаков Н.М.* Рекреационное лесопользование. Сыктывкар: СЛИ, 2006. 312 с.
3. *Петров В.Н., Зубко А.А.* Экономическая оценка лесной рекреации. СПб.: Наука, 2005. 195 с.
4. *Мусин Х.Г., Зарипов Д.И.* Некоторые подходы к оценке рекреационного лесопользования // Вестн. Казанского ГАУ. 2013. Т. 8, № 1 (27). С. 116–120.
5. *Попков В.П., Казаков Н.П., Якубовская Н.А.* Рекреационное лесопользование и его эколого-экономическая эффективность // Вестн. ЛГУ им. А.С. Пушкина. 2013. Т. 6, № 3. С. 78–85.
6. *Султанова Р.Р., Мартынова М.В., Савельева И.А.* Рекреационное лесопользование в Республике Башкортостан: состояние и перспективы // Вестн. Башкирского ГАУ. 2015. № 1. С. 114–121.
7. *Сулейманова Ж.Р., Назимова Д.И., Корец М.А.* Ландшафтно-экологический подход в рекреационном лесопользовании в горах на юге Красноярского края // Сиб. лесной журн. 2019. № 2. С. 3–15. Doi: 10.15372/SJFS20190201.
8. *Торгашев Р.Е., Голованов В.И.* Управление природоохранным рекреационным лесопользованием Московского столичного региона // Муниципальная академия. 2022. № 1. С. 148–160. Doi: 10.52176/2304831X_2022_01_148.
9. *Мартынов А.В., Жалсобон Т.Б., Шагжиев К.Ш.* Методические основы организации рекреационного лесопользования на землях лесного фонда Бурятии // Вестн. БГУ. 2015. Вып. 4 (1). С. 182–187.
10. *Макаренко Е.Л.* Лесопользование в центральной экологической зоне Байкальской природной территории (Иркутская область) // География и природные ресурсы. 2016. № S5. С. 158–167. Doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(158-167).
11. *Пуцукова С.Д.* Вклад лесов бассейна р. Селенга в экономическое развитие трансграничных территорий (РБ, Монголия) // Проблемы современной экономики. 2020. № 3 (75). С. 195–200.
12. Лесной план РБ / Республиканское агентство лесного хозяйства. Улан-Удэ, 2021. 88 с. URL: <https://egov-buryatia.ru/ralh/activities/documents/lesnoy-plan/> (дата обращения: 26.09.2022).
13. Сведения о землях лесного фонда (тысяч гектаров) по состоянию на 01.07.2021. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-ForestFund> (дата обращения: 26.09.2022).
14. Общий запас древесины лесных насаждений на землях лесного фонда и землях иных категорий, млн м³ (по состоянию на 01.07.2021). URL: <https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-WoodStock> (дата обращения: 26.09.2022).
15. *Санжеев Э.Д.* Особенности формирования системы рекреационного землепользования в регионах Великого Чайного пути (на примере РБ) // Специфика территориальных и природных условий в социально-экономическом развитии страны: материалы IV Междунар. науч. конф. Улан-Батор: Соёмбо принтинг, 2019. С. 460–464.
16. Информация о договорах на лесные участки Иркутской области. URL: <https://irkobl.ru/sites/alh/OpenData/> (дата обращения: 26.09.2022).
17. Атлас РБ. Чита: Забайкальское аэрогеодезическое предприятие, 2004. 88 с.
18. Интерактивная карта «Леса России». URL: <https://maps.roslesinforg.ru/#/> (дата обращения: 16.10.2022).
19. Леса высокой природоохранной ценности (ЛВПЦ) РБ. URL: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-buryatiya> (дата обращения: 16.10.2022).
20. Официальный сайт Министерства туризма РБ. URL: <https://egov-buryatia.ru/minturizm/> (дата обращения: 10.01.2023).
21. Публичная кадастровая карта. Роскадастр. Кадастр недвижимости в России. URL: <https://roskadastr.com> (дата обращения: 10.01.2023).
22. Республика Бурятия. URL: <https://2gis.ru/> (дата обращения: 16.10.2022).
23. *Борисова Т.А., Бешенцев А.Н.* Риски лесных пожаров в бассейне озера Байкал: статистическая оценка и картографирование // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 4. С. 26–33. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-26-33.

24. Правила организации туризма и отдыха в центральной экологической зоне Байкальской природной территории в Республике Бурятия. URL: <https://egov-buryatia.ru/minturizm/activities/documents/> (дата обращения: 26.09.2022).

25. Шадже А.Е., Шадже А.И. Организация рекреационного лесопользования на Северо-Западном Кавказе // Вестн. МГТУ. 2010. № 2. С. 23–28.

References

1. Tarasov A.I. *Economics of recreational forest management*. Moscow: Agropromizdat Publ.; 1986. 176 p. (In Russ.).
2. Bolshakov N.M. *Recreational forest use*. Syktyvkar: Syktyvkar Forest Institute Press; 2006. 312 p. (In Russ.).
3. Petrov V.N., Zubko A.A. *Economic evaluation of forest recreation*. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2005. 195 p. (In Russ.).
4. Musin Kh.G., Zaripov D.I. Some aspects to the recreational forest assessment. *Vestn. Kazanskogo GAU = Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2013;8(1):116-120. (In Russ.).
5. Popkov V.P., Kazakov N.P., Yakubovskaya N.A. Recreational forestry and its ecological and economic effectiveness. *Vestn. LGU im. A.S. Pushkina = Pushkin Leningrad State University Journal*. 2013;6(3):78-85. (In Russ.).
6. Sultanova R.R., Martynova M.V., Savelyeva I.A. Recreational forest management in the Republic of Bashkortostan: status and prospects. *Vestn. Bashkirskogo GAU = Vestnik of the Bashkir State Agrarian University*. 2015;(1):114-121, doi: 10.15372/SJFS20190201. (In Russ.).
7. Suleimanova Zh.R., Nazimova D.I., Korets M.A. Landscape-ecological approach to the recreational forest use in the mountains of the south of Krasnoyarsk territory. *Sib. lesnoi zhurn. = Siberian Journal of Forest Science*. 2019;(2):3-15. (In Russ.).
8. Torgashev R.E., Golovanov V.I. Management of environmental and recreational forest management of the Moscow metropolitan region. *Munitsipal'naya akademiya = Municipal Academy*. 2022;(1):148-160, doi: 10.52176/2304831X_2022_01_148. (In Russ.).
9. Martynov A.V., Zhalsobon T.B., Shagzhiev K.Sh. Methodological bases of the organization recreational forest-use on the lands of the forest fund of the Republic of Buryatia. *Vestn. BGU = BSU Bulletin*. 2015;(4):182-187. (In Russ.).
10. Makarenko E.L. Forest management in the central ecological zone of the Baikal natural territory (Irkutsk region). *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2016;(S5):158-167, doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(158-167). (In Russ.).
11. Puntsukova S.D. Contribution of forests of Selenga river basin into the economic development of transborder territories (Republic of Buryatia, Mongolia). *Problemy sovremennoi ekonomiki = Problems of Modern Economics*. 2020;(3):195-200. (In Russ.).
12. *Forest Plan of the Republic of Buryatia*. Republican Forestry Agency. Ulan-Ude, 2021. 88 p. Available from: <https://egov-buryatia.ru/ralh/activities/documents/lesnoy-plan/> [Accessed 26th September 2022]. (In Russ.).
13. *Information about the lands of the forest fund (thousand hectares) as of July 1, 2021*. Available from: <https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-ForestFund> [Accessed 26th September 2022]. (In Russ.).
14. *The total stock of wood of forest plantations on the lands of the forest fund and lands of other categories, million cubic meters (as of July 1, 2021)*. Available from: <https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-Wood-Stock> [Accessed 26th September 2022]. (In Russ.).
15. Sanzheev E.D. Features of the formation of a system of recreational land use in the regions of the Great Tea Road (on the example of the Republic of Buryatia). *Specifics of territorial and natural conditions in the socio-economic development of the country*. Proceedings of the IV International Scientific Conference. Ulan-Bator: Soyombo Printing Publ.; 2019:460-464. (In Russ.).
16. *Information on contracts for forest plots in the Irkutsk region*. Available from: <https://irkobl.ru/sites/alh/OpenData/> [Accessed 26th September 2022]. (In Russ.).
17. *Atlas of the Republic of Buryatia*. Chita: Trans-Baikal Aerogeodetic Enterprise Press; 2004. 88 p. (In Russ.).
18. *Interactive map "Forests of the Russia"*. Available from: <https://maps.roslesinforg.ru/#/> [Accessed 16th October 2022]. (In Russ.).
19. *High Conservation Value Forests (HCVF) of the Republic of Buryatia*. Available from: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-buryatiya> [Accessed 16th October 2022]. (In Russ.).
20. *Official website of the Ministry of Tourism of the Republic of Buryatia*. Available from: <https://egov-buryatia.ru/minturizm/> [Accessed 10rd January 2023]. (In Russ.).
21. *Public cadastral map. Roscadastre. Real estate cadastre in the Russia*. Available from: <https://roskadastr.com> [Accessed 10rd January 2023]. (In Russ.).
22. *Republic of Buryatia*. Available from: <https://2gis.ru/> [Accessed 16th October 2022]. (In Russ.).

23. Borisova T.A., Beshentsev A.N. Risks of Forest Fires in the Lake Baikal Basin: Statistical Assessment and Mapping. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4)26-33, doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-26-33. (In Russ.).

24. *Rules for the organization of tourism and recreation in the central ecological zone of the Baikal natural territory in the Republic of Buryatia*. Available from: <https://egov-buryatia.ru/minturizm/activities/documents/> [Accessed 26th September 2022]. (In Russ.).

25. Shadzhe A.E., Shadzhe A.I. Organization of recreational forest management in the North-West Caucasus. *Vestn. MGTU = Bulletin of Maikop State Technological University*. 2010;(2):23-28. (In Russ.).

Информация об авторах

Э.Д. Санжеев – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория экономики природопользования.

М.Б. Намдаков – аспирант, лаборатория экономики природопользования.

Information about the authors

E.D. Sanzheev - Candidate of Science (Geography), Senior Researcher, Laboratory of Environmental Economics.

M.B. Namdakov - Postgraduate Student, Laboratory of Environmental Economics.

*Статья поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 15.01.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 18.10.2022; approved after reviewing 15.01.2023; accepted for publication 19.05.2023.*

Научная статья

УДК 332.3

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-115-120

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЗЕМЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Галина Анатольевна Стекольников^{1✉}, Иванна Ивановна Курашова²

^{1,2} Дальневосточный государственный аграрный университет, Благовещенск, Россия

¹ gala76.08@mail.ru ✉

² ivannakurasova@gmail.com

Аннотация. В статье представлен анализ качественного состояния земель в границах колхоза «Надежда» Завитинского муниципального округа Амурской области. Общая площадь сельскохозяйственных угодий предприятия составляет 3765 га. На территории колхоза наиболее распространены бурые лесные и луговые почвы (2642,4 га, 70,2 % общей площади хозяйства). Показатель почвенного плодородия земельных ресурсов составил 0,57 ед. Значительные площади относятся к сильнокислым (1620,4 га) и среднекислым (990,7 га). Наибольшая территория (2000 га, или 70,5 %) отведена под выращивание сои, 335 га занимают пары. Анализ пространственной структуры территории землепользования на основе рассчитанных коэффициентов компактности, удаленности, прямолинейности, а также расчлененности овражно-балочной системы позволил сделать вывод, что в целом земельные ресурсы хозяйства расположены компактно, имеют благоприятную конфигурацию землепользования с незначительной удаленностью, а коэффициент расчлененности указывает на увеличение количества затрат на транспортировку готовой продукции. Выполненный расчет балла бонитета для 37 земельных участков позволил установить общий балл бонитета всей территории землепользования (53). Анализ продуктивности сельскохозяйственных угодий показал, что расчетная потенциальная урожайность на рассматриваемых участках колхоза «Надежда» выше фактической на 80 % по сое, на 71,5 % – по овсу. Следовательно, производственный потенциал земельных ресурсов предприятия значительно выше, чем фактическая продуктивность, что является прямым доказательством нерационального использования земель при возделывании сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: плодородие почв, потенциал земельных ресурсов, пространственные условия, почвенные разновидности, бонитировка, потенциальная урожайность, экономическая эффективность

Для цитирования: Стекольников Г.А., Курашова И.И. Оценка потенциала земельных ресурсов сельскохозяйственного предприятия // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 115–120.

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

Original article

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF LAND RESOURCES OF AN AGRICULTURAL ENTERPRISE

Galina A. Stekolnikova^{1✉}, Ivanna I. Kurashova²

^{1,2} Far Eastern State Agrarian University, Blagoveshchensk, Russia

¹ gala76.08@mail.ru ✉

² ivannakurasova@gmail.com

Abstract. The article presents an analysis of the qualitative state of the lands within the boundaries of the collective farm “Nadezhda” of the Zavitsinsky municipal district of the Amur region. The total area of agricultural land of the enterprise is 3765 hectares. On the territory of the collective farm, the most common brown forest and meadow soils are 2642.4 hectares, or 70.2 % of the total area of the farm. The indicator of soil fertility of the land resources of the collective farm “Nadezhda” was 0.57 units. Significant areas of the farm belong to highly acidic (1620.4 ha) and medium acidic soils (990.7 ha). The largest area of 2000 hectares, or 70.5 %, is reserved for

© Стекольников Г.А., Курашова И.И., 2023

soybean cultivation, and 335 hectares are occupied by couples. The analysis of the spatial structure of the land use territory based on the calculated coefficients of compactness, remoteness, straightness, as well as the dismemberment of the ravine-beam system allowed us to conclude that, in general, the land resources of the economy are located compactly, have a favorable configuration of land.

Keywords: soil fertility, potential of land resources, spatial conditions, soil varieties, bonification, potential yield, economic efficiency

For citation: Stekolnikova G.A., Kurashova I.I. Assessment of the Potential of Land Resources of an Agricultural Enterprise. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):115-120. (In Russ.).

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

Введение

В рамках реализации Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2030 гг. при выращивании сельскохозяйственных культур особенно остро встает вопрос сохранения земельных ресурсов, главным показателем которых является плодородие, т.е. способность почвы удовлетворять потребности растений в питании, воде, обеспечении корневой системы достаточным количеством тепла и воздуха, благоприятной физико-химической средой для правильного развития и роста [1, 2]. Количественные и качественные изменения факторов и условий плодородия почв тесно связаны с процессами образования, накопления и передачи энергии. Данные трансформации могут быть как в пользу развития плодородия и способствовать его повышению, так и приводить к его снижению.

В настоящее время под влиянием природных и антропогенных факторов усиливается процесс культурного почвообразования. Его освоение при целенаправленной деятельности человека способствует повышению плодородия почвы [3]. Оптимальные параметры почвенных свойств представляют собой совокупность количественных показателей, при которых жизненно важные для растений факторы могут быть использованы максимально, полностью раскрывая потенциал растений, обеспечивая наивысшую продуктивность при хорошем качестве. Оценка потенциала земельных ресурсов независимо от их свойств относится к неперенным условиям успешного развития экономики и природопользования, что и обусловило актуальность выбранной темы.

Цель исследований – анализ качественного состояния земель в границах сельскохозяйственного предприятия и повышение эффективности производства колхоза «Надежда» Завитинского муниципального округа Амурской области.

Объекты и методы исследования

Объектом работы являются земельные ресурсы в границах сельскохозяйственного предприятия колхоза «Надежда» Завитинского муниципального округа Амурской области. При анализе современного состояния сельскохозяйственных угодий применялись общепринятые методики, характеризующие пространственные условия территории землепользования [4].

Колхоз «Надежда» действует с 16 мая 2002 г. Земельные площади сельскохозяйственного предприятия располагаются на территориях трех сельских поселений. Центральная усадьба находится в с. Антоновка, в 180 км от областного центра (г. Благовещенск) и в 24 км от районного центра (г. Завитинск). По состоянию на 01.01.2022 г. его общая площадь составила 3765 га. Все земли являются арендованными [5].

На территории колхоза распространены бурые лесные, дерново-луговые глинистые и луговые глееватые глинистые почвы.

Бурые лесные почвы занимают достаточно большие территории хозяйства. Участки с подходящими для возделывания топографическими элементами разрабатываются как возделываемые земли. Мощность пахотного горизонта 18–22 см. Механический состав почв изменяется от легкого до тяжелого суглинка, содержание гумуса в пахотном горизонте не превышает 3,5 %, фосфора – 1,5–3,0 мг, калия – 16–20 мг на 100 г почвы. Реакция среды варьирует от слабокислой до сильнокислой. Почвы подвержены водной эрозии.

Второе место после бурых лесных почв принадлежит луговым почвам. Следует отметить, что содержание гумуса в пахотном слое этих земель невысокое и колеблется в пределах от 3,8 до 5,7 %. Реакция среды изменяется от сильнокислой до средней, pH солевой 4,0–4,7. Содержание фосфора составляет 2–4 мг, а калия – 0,7–10 мг на 100 г почвы.

Дерново-луговые глинистые почвы имеют ограниченное распространение на территории хозяйства и используются как пастбищные угодья [6].

В табл. 1 представлена характеристика почв, распространенных на территории колхоза «Надежда».

Почвы с высоким плодородием (луговые, лугово-бурые, бурые лесные) занимают самые значительные площади (2642,4 га, 70,2 %). Бурые лесные оподзоленные глееватые, лугово-бурые глееватые, пойменно-луговые почвы менее плодородны по сравнению с указанными выше типами почв, распространены на территории, равной 1105,6 га, или 29,4 % от общей площади колхоза. Наименьшее пространство приходится на дерново-луговые глееватые, дерново-подзолисто-глееватые почвы, что составляет всего 17 га.

Таблица 1 / Table 1

Почвенные разновидности земель колхоза «Надежда» Завитинского муниципального округа Амурской области / Soil varieties of the lands of the collective farm “Nadezhda” of the Zavitinsky municipal district of the Amur region

Тип почвы	Механический состав	Площадь, га	% от общей площади
Лугово-бурые, бурые лесные, луговые	Легкий суглинок	2642,4	70,2
Бурые лесные, бурые лесные оподзоленные глееватые, лугово-бурые глееватые, пойменно-луговые	Тяжелый суглинок, глина	1105,6	29,4
Дерново-луговые глееватые, дерново-подзолисто-глееватые	Тяжелый суглинок, глина	17,0	0,4
Итого		3765,0	100

Согласно проведенным исследованиям агрохимических свойств почв, показатель почвенного плодородия земельных ресурсов колхоза «Надежда» составил 0,57 ед. Установлено, что по степени кислотности наиболее распространены сильнокислые (1620,4 га, или 44 %) и среднекислые (990,7 га, или 27 %) почвы. Данное обстоятельство указывает на необходимость разработки и внедрения мероприятий, способствующих снижению кислотности почвы, с целью повышения продуктивности выращиваемых культур. Обращает на себя внимание и тот факт, что в хозяйстве имеются земли со слабокислой и близкой к нейтральной щелочной реакцией (798,2 га, или 21,2 % от общей территории колхоза).

Обсуждение результатов

При анализе современного состояния земельных ресурсов колхоза рассмотрены пространственные характеристики территории землепользования, которые по внутренним признакам включают в себя определение таких показателей, как коэффициенты компактности, удаленности, прямолинейности, расчлененности овражно-балочной сетью [7].

В ходе выполненных расчетов установлено, что коэффициент компактности сельскохозяйственных ресурсов составил 1,5. Его учет показывает, во сколько раз затраты на транспортные перевозки возрастают по сравнению с эталоном. В то же время коэффициент прямолинейности границ землепользования, характеризующий степень их изломанности, составил 1,4. Это свидетельствует о том, что конфигурация территории землепользования хозяйства довольно-таки благоприятна, так как полученное значение приближено к 1.

Средняя удаленность земельных участков от центральной усадьбы – 0,8 км, что допустимо для эффективного сельскохозяйственного производства. Коэффициент расчлененности землепользования оврагами и канавами составил всего 0,3, что свидетельствует о не совсем неблагоприятной пространственной структуре землепользования.

Выполненные расчеты коэффициентов компактности территории землепользования колхоза «Надежда» оказались выше, чем в среднем по округу, что напрямую указывает на то, что имеющаяся пространственная структура землепользования хозяйства вносит свой существенный

вклад в дополнительные производственные затраты, увеличивая расходы на транспортировку сельскохозяйственной продукции.

Оценка бонитировки почв хозяйства осуществлялась по основным характеристикам почвы, коррелирующим со средней многолетней урожайностью сельскохозяйственных культур, выращиваемых на ней. Поэтому при бонитировке почв выделяют относительную ценность почв, которая определяет, во сколько раз данная почва лучше или хуже другой по своим характеристикам и урожайности [8]. Для определения средних значений показателей по отдельным видам почв всесторонне изучались материалы комплексного обследования, а также выбирались фактические данные по показателям почв – сведения о структурах почвенных покровов территорий, многолетних данных по урожайности сельскохозяйственных культур. При этом использовался расчётный метод определения балла бонитета [4], в нашем случае – для 37 земельных участков. В результате установлено, что минимальный расчётный балл бонитета – 36, а максимальный – 85. Следует отметить, что общий балл бонитета территории землепользования колхоза «Надежда» – 53.

Под продуктивностью сельскохозяйственных земель понимается способность почв давать максимальный урожай при минимальных производственных затратах. Среди выращиваемых колхозом «Надежда» культур наибольшая площадь отведена под возделывание сои, что составляет 2000 га от общей площади хозяйства, или 70,5 %. При этом территория для выращивания овса занимает всего 500 га, или 17,7 %. Под пар отведена территория, равная 335 га, или 11,8 % [5]. В данном исследовании рассмотрена продуктивность только пахотных земель, т.е. земель, находящихся в сельскохозяйственном обороте в качестве пашни. Продуктивность земель сельскохозяйственного предприятия проанализирована в виде таких показателей, как урожайность сельскохозяйственных культур, возделываемых на территории объекта, расчётная потенциальная урожайность.

Нами выполнен анализ продуктивности сельскохозяйственных угодий за счет перерасчёта урожайности основных сельскохозяйственных культур, возделываемых колхозом. Полученная расчётная урожайность считается потенциальной, если она может быть достигнута с применением научно обоснованных приемов возделывания сельскохозяйственных культур в условиях региона и с учетом природных факторов [9, 10]. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

**Расчет потенциальной урожайности колхоза «Надежда»
/ Calculation of the potential yield of the collective farm “Nadezhda”**

Культура	Средний балл бонитета	Урожайность, ц/га		Разница между фактической и потенциальной урожайностью, ц/га
		Фактическая	Расчётная потенциальная	
Соя	53	11	19,8	-8,8
Овес		13	22,3	-9,3

В результате установлено, что расчётная потенциальная урожайность на рассматриваемых участках колхоза «Надежда» выше по сравнению с фактической урожайностью по сое на 80 %, по овсу – на 71,5.

На основании этого можно сделать вывод, что в настоящее время производственный потенциал сельскохозяйственных угодий колхоза «Надежда» гораздо выше, чем имеющиеся полученные значения продуктивности. Данное обстоятельство напрямую свидетельствует о том, что сельскохозяйственное предприятие не в полной мере использует природный потенциал, что приводит к снижению экономической эффективности отрасли растениеводства.

Для определения экономической эффективности проведенных исследований нами выполнен расчет фактической и потенциальной прибыли с продажи выращиваемых культур (табл. 3).

Таким образом, полученные значения фактической и потенциальной прибыли наглядно демонстрируют тот факт, что использование в не полной мере потенциала земельных ресурсов приводит к уменьшению урожайности выращиваемых сельскохозяйственных культур, сокращению валовой продуктивности более чем на 78 %, а также к потере потенциальной прибыли в размере 75 797 тыс. руб.

Таблица 3 / Table 3

Фактическая и потенциальная прибыль при реализации продукции растениеводства колхоза «Надежда» / Calculation of actual and potential profit in the sale of crop production of the collective farm “Nadezhda”

Культура	Посевная площадь, га	Валовая продуктивность, т		Прибыль, тыс. руб.		Разница между фактической и потенциальной прибылью, тыс. руб.
		Фактическая	Потенциальная	Фактическая	Потенциальная	
Соя	2000	2200	3960	89980	161964	-71984
Овес	500	650	1115	5330	9143	-3813
Итого	2500	2850	5075	95310	171107	-75797

Выводы

Пространственные характеристики территории землепользования являются показателями, характеризующими природные условия земельных ресурсов. Установлено, что территория, используемая под сельскохозяйственное производство, не компактна, что приводит к увеличению расходов на транспортировку получаемой продукции.

Анализ качественного состояния сельскохозяйственных угодий территории землепользования колхоза «Надежда» показал, что земельные ресурсы при производстве сельскохозяйственной продукции используются в неполной мере, что подтверждается серьезной разницей в величине потенциальной и фактической урожайности сельскохозяйственных культур, а также в получении валовой продукции.

Эффективность деятельности предприятия выражается в получении прибыли в случае всестороннего учета потенциала земельных ресурсов. Данное обстоятельство подтверждается величиной убытка потенциальной прибыли в размере 75 797 тыс. руб. Для повышения фактической урожайности предлагается строгое соблюдение природных, пространственных, климатических, агротехнических и других условий.

Выполненный анализ природных условий земельных ресурсов сельскохозяйственного предприятия позволяет сделать вывод, что потенциальная урожайность рассматриваемых угодий указывает на имеющуюся возможность получения более высоких урожаев, что свидетельствует о нерациональном современном использовании земельных ресурсов сельскохозяйственным предприятием. Это недопустимо в рамках реализации программы развития сельского хозяйства, а также в условиях современной политики решения продовольственной безопасности страны.

Список источников

1. Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2030 годы: постановление Правительства Российской Федерации от 25.08.2017 № 996 (ред. 13.05.2022) // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_223631/ (дата обращения: 08.01.2023).

2. Бельмач Н.В. Применение трансформации земель при совершенствовании землепользования сельскохозяйственного предприятия // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Благовещенск: Дальневосточный гос. аграр. ун-т, 2021. С. 311–315.

3. Маканникова М.В., Бельмач Н.В., Высоцкая Ю.С. Современное использование и охрана земель сельскохозяйственных предприятий // Вестн. Курской гос. с.-х. академии. 2019. № 6. С. 36–42.

4. Волков С.Н. Землеустройство. Т. 1: Теоретические основы землеустройства: учебник. М.: Колос, 2015. 496 с.

5. Министерство сельского хозяйства Амурской области /Официальный сайт министерства сельского хозяйства. URL: <https://agro.amurobl.ru/> (дата обращения: 08.01.2023).

6. Почвенное дело Завитинского муниципального округа Амурской области.

7. Рогатнев Ю.М., Долматова О.Н. Эффективное использование земельных ресурсов как основа устойчивого развития сельского хозяйства региона (на материалах Омской области). Омск: Изд-во Омского ГАУ, 2017. 188 с.

8. О землеустройстве: Федеральный закон от 18.06.2001 № 78-ФЗ (ред. от 30.12.2021) // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_32132/ (дата обращения: 08.01.2023).

9. Система земледелия Амурской области: производ.-практ. справочник / под общ. ред. П.В. Тихончука. Благовещенск: Изд-во Дальневосточного ГАУ, 2016. 570 с.

10. Сахарова А.А., Стекольников Г.А. Состояние и пути повышения использования земельных ресурсов индивидуального предпринимателя Арутюнян Левон Анушаванович – глава КФХ // Актуальные вопросы землеустройства, геодезии и природообустройства : материалы Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., посвященной 15-летию Ин-та землеустройства, кадастров и мелиорации, Улан-Удэ, 23 декабря 2020 г. Улан-Удэ: Бурятская гос. с.-х. академия имени В.Р. Филиппова, 2020. С. 191–194.

References

1. On the approval of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Agriculture for 2017-2030: Decree of the Government of the Russian Federation dated August 25, 2017 No. 996 (ed. May 13, 2022). *ConsultantPlus*. Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_223631/ [Accessed 08th January 2023]. (In Russ.).

2. Belmach N.V. The use of land transformation in improving the land use of agricultural enterprises. *Agro-industrial complex: problems and prospects of development*. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University Press; 2021:311-315. (In Russ.).

3. Makannikova M.V., Belmach N.V., Vysotskaya Yu.S. Modern use and protection of agricultural enterprises' lands. *Vestn. Kurskoi gos. s.-kh. akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2019;(6):36-42. (In Russ.).

4. Volkov S.N. *Land management. Vol. 1: Theoretical foundations of land management*: Textbook. Moscow: Kolos Publ.; 2015. 496 p. (In Russ.).

5. *Ministry of Agriculture of the Amur Region. Official website of the Ministry of Agriculture*. Available from: <https://agro.amurobl.ru/> [Accessed 08th January 2023]. (In Russ.).

6. *Soil business of the Zavitsinsky municipal district of the Amur region*. (In Russ.).

7. Rogatnev Yu.M., Dolmatova O.N. *Effective use of land resources as a basis for sustainable development of agriculture in the region (based on the materials of the Omsk region)*. Omsk: Omsk State University Press; 2017. 188 p. (In Russ.).

8. About land management: Federal Law No. 78-FZ of June 18, 2001 (as amended on December 30, 2021). *ConsultantPlus*. Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_32132/ [Accessed 08th January 2023]. (In Russ.).

9. Tikhonchuk P.V., ed. *The system of agriculture of the Amur region: a production and practical handbook*. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University Press; 2016. 570 p. (In Russ.).

10. Sakhharova A.A., Stekolnikova G.A. The state and ways of increasing the use of land resources of an individual entrepreneur Harutyunyan Levon Anushavanovich – head of the farm. *Topical issues of land management, geodesy and environmental management*. Materials of All-Russian (National) Scientific and Practical Conference dedicated to the 15th anniversary of the Institute of Land Management, Cadastre and Land Reclamation, Ulan-Ude, December 23, 2020. Ulan-Ude: Filippov Buryat State Agricultural Academy Press; 2020:191-194. (In Russ.).

Информация об авторах

Г.А. Стекольников – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра геодезии и землеустройства.

И.И. Курашова – бакалавр.

Information about the authors

G.A. Stekolnikova - Candidate of Science (Agricultural Science), Associate Professor, Department of Geodesy and Land Management.

I.I. Kurashova - Bachelor Student.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 10.01.2023; approved after reviewing 20.02.2023; accepted for publication 19.05.2023.

Научная статья

УДК 504.054, 631.453

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-121-129

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ЦИНКОМ И КАДМИЕМ ВДОЛЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ГОРОДА ВОЛЖСКОГО

Денис Сергеевич Сухоносенко

Волжский филиал Волгоградского государственного университета, Волжский, Россия

dsuhonosenko@mail.ru

Аннотация. Проанализирован характер загрязнения цинком и кадмием придорожной почвы г. Волжского. Превышений ориентировочно допустимых концентраций валовых форм цинка и кадмия в почве не обнаружено. Концентрация цинка в почве вблизи автомобильных дорог г. Волжского не коррелирует с концентрацией кадмия. Изучено влияние интенсивности и структуры транспортного потока, уровня озеленения и возраста застройки на пространственную динамику концентраций цинка и кадмия в почве. Вблизи автомобильных дорог с интенсивным движением транспорта концентрация цинка в почве больше, чем на менее загруженных дорогах. Концентрация кадмия в почве выше вдоль дорог, где в структуре транспортного потока велика роль грузовых автомобилей и автобусов. Придорожные участки с более высоким уровнем озеленения характеризуются меньшими концентрациями цинка в почве. Между концентрацией кадмия в почве и уровнем озеленения придорожных участков не выявлено статистически значимой связи. Не обнаружена связь между возрастом застройки и концентрациями цинка и кадмия в придорожной почве. Концентрация тяжелых металлов в почве вблизи автомобильных дорог, по-видимому, зависит от множества факторов. Влияние одних факторов перекрывается влиянием других, что усложняет выявление четких взаимосвязей.

Ключевые слова: загрязнение почвы, тяжелые металлы, автомобильные дороги, интенсивность потока машин, уровень озеленения, возраст застройки

Для цитирования: Сухоносенко Д.С. Исследование характера загрязнения почвы цинком и кадмием вдоль автомобильных дорог города Волжского // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 121–129.

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

Original article

STUDY OF THE CHARACTER OF SOIL POLLUTION WITH ZINC AND CADMIUM ALONG THE ROADS OF THE CITY OF VOLZHISKY

Denis S. Suhonosenko

Volzhsky Branch of the Volgograd State University, Volzhsky, Russia

dsuhonosenko@mail.ru

Abstract. The character of zinc and cadmium pollution of the roadside soil of the city of Volzhsky is analyzed. Exceedings of approximately permissible concentrations of total forms of zinc and cadmium in the soil were not found. The concentration of zinc in the soil near the highways of the city of Volzhsky does not correlate with the concentration of cadmium. The influence of the intensity and structure of the traffic flow, the level of landscaping and the age of development on the spatial dynamics of the concentrations of zinc and cadmium in the soil was studied. Near highways with heavy traffic, the concentration of zinc in the soil is greater than on less busy roads. The concentration of cadmium in the soil is higher along the roads, where the role of trucks and buses in the structure of the traffic flow is high. Roadside areas with a higher level of greenery are characterized by lower

© Сухоносенко Д.С., 2023

concentrations of zinc in the soil. There was no statistically significant relationship between the concentration of cadmium in the soil and the level of landscaping of roadside areas. No relationship was found between the age of development and the concentrations of zinc and cadmium in the roadside soil. The concentration of heavy metals in soil near highways seems to depend on many factors. The influence of some factors overlaps with the influence of others, which complicates the identification of clear relationships.

Keywords: soil pollution, heavy metals, highways, traffic intensity, landscaping level, building age

For citation: Suhonosenko D.S. Study of the Character of Soil Pollution with Zinc and Cadmium Along the Roads of the City of Volzhsky. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):121-129. (In Russ.).

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

Постановка проблемы

Проблема загрязнения почвы тяжелыми металлами актуальна для многих городов России [1–7] и районов мира [8–12]. Одним из основных источников поступления тяжелых металлов в городскую среду является автомобильный транспорт. Значительная часть тяжелых металлов, образующихся при движении автомобилей, накапливается в придорожной почве. Высокие концентрации свинца, цинка, кадмия вдоль автомобильных дорог могут вызывать деградацию почвы [6] и ухудшать условия произрастания придорожных растений.

Механизмы поступления тяжелых металлов от автотранспорта разнообразны: расход топлива и моторного масла, износ шин и тормозов, истирание поверхности дорожного полотна [9–14]. Основными источниками кадмия на автомобильных дорогах являются утечки моторного масла и износ шин [9, 10, 14]. Цинк может поступать в результате износа и коррозии металлических изделий (тормоза, элементы двигателя, кузов автомобиля), а также истирания шин и сжигания топлива [9, 10, 12–14]. Выбросы свинца с выхлопными газами – основной механизм поступления при использовании этилированного бензина. Если этот вид топлива не используется, свинец поступает в результате износа тормозов и металлических сплавов в двигателе, а также износа шин [9, 14]. Основная часть меди на автомобильных дорогах поступает вследствие износа тормозов [9, 14].

Факторы, определяющие пространственное распределение тяжелых металлов в придорожной почве, крайне разнообразны: интенсивность и структура потока машин [15–20], возраст застройки [21–23], уровень озеленения участка [9, 18, 22, 24], наличие светофоров [15, 16, 19, 25], особенности рельефа [9], характер застройки вдоль дороги [18, 25], направление ветровых потоков [9, 16–18, 25], распределение талого и дождевого стока [9, 26].

Вдоль дорог с высокой интенсивностью транспортного потока больше концентрация тяжелых металлов в почве [15, 19, 27]. На придорожных участках с высоким уровнем озеленения почвы меньше загрязнены тяжелыми металлами [9]. Выявлена прямая связь между возрастом (продолжительностью эксплуатации) района и концентрацией тяжелых металлов в почве [9, 23, 27]. На регулируемых светофорами участках дороги, где автомобили регулярно тормозят и останавливаются, формируются зоны повышенной концентрации тяжелых металлов в почве [19, 25].

Целью данной работы является анализ характера загрязнения цинком и кадмием придорожной почвы г. Волжского. Для этого изучено влияние интенсивности и структуры транспортного потока, уровня озеленения и возраста застройки на пространственную динамику концентраций цинка и кадмия в почве.

Объект исследования

Волжский относится к категории крупных городов – численность населения 321 тыс. чел. Площадь территории города составляет 230 км². Город расположен в пределах Хвалынской аккумулятивной равнины (террасы). Терраса имеет ровную поверхность, сложенную хвалынскими глинами темно-коричневого (шоколадного) цвета. Природно-ландшафтные особенности исследуемой территории обусловлены ее принадлежностью к Заволжскому полупустынный ландшафтному району. На всей территории города – однородный почвенный покров, представленный светло-каштановыми почвами. Среди светло-каштановых почв доминируют солонцеватые раз-

новидности. По механическому составу преобладают глинистые и тяжелосуглинистые разновидности. Таким образом, вся исследуемая территория характеризуется однородностью рельефа и почвенного покрова, что является важным условием при исследовании накопления тяжелых металлов в почве.

На всех автомобильных дорогах г. Волжского в структуре транспортного потока преобладают легковые автомобили. Доля грузовых автомобилей минимальна. Наиболее крупные дороги города характеризуются интенсивным потоком маршрутных такси.

Придорожная древесная растительность в г. Волжском представлена в основном вязом мелколистным, тополем черным, тополем белым, робинией, конским каштаном. Озеленение носит преимущественно однорядный тип.

Методика

В рамках данного исследования вблизи автомобильных дорог г. Волжского заложена 41 пробная площадка. Все пробные площадки располагались на участках с однородным рельефом и почвенным покровом. Пробы почвы отбирались в двух метрах от проезжей части автомобильных дорог с глубины 0–5 см. Образцы почвы отбирали в 4 углах и из центра пробной площади, высыпали их вместе, тщательно перемешивали, а затем отбирали средний образец общей массой не менее 1 кг. Для измерения массовых концентраций тяжелых металлов был использован анализатор ТА-4. Определение концентраций элементов проводили методом инверсионной вольтамперометрии. Определялось валовое содержание цинка и кадмия в почве.

Подсчет интенсивности движения автотранспорта проводился на тех же участках улично-дорожной сети, где были отобраны пробы почвы. Подсчет проводился в течение 20 мин в утренний (с 7–8 до 10–11 ч) и вечерний (с 16–17 до 19–20 ч) часы пик. Подсчет автотранспортных средств проведен синхронно, раздельно по каждому направлению движения.

Оценка уровня озеленения проведена на тех же участках улично-дорожной сети, где были отобраны пробы почвы. На пробных площадках проводился сплошной пересчет деревьев. К деревьям отнесены растения, имеющие четко выраженный деревянистый ствол(ы) диаметром не менее 5 см на высоте 1,3 м. Для выбранных придорожных участков рассчитан показатель доли территории, занятой древесной растительностью, – отношение площади зеленых насаждений (деревьев) к площади, на которой проводилась инвентаризация. Площадь под посадкой дерева принималась равной 0,5 м².

Результаты и обсуждение

Концентрация цинка в почве вдоль автомобильных дорог г. Волжского варьируется в диапазоне от 12 до 56 мг/кг (рисунок). Среднее значение составляет 33,73 мг/кг. Ориентировочная допустимая концентрация (ОДК) валовых форм цинка для суглинистых и глинистых почв составляет 220 мг/кг. Данный норматив не был превышен ни на одной пробной площадке.

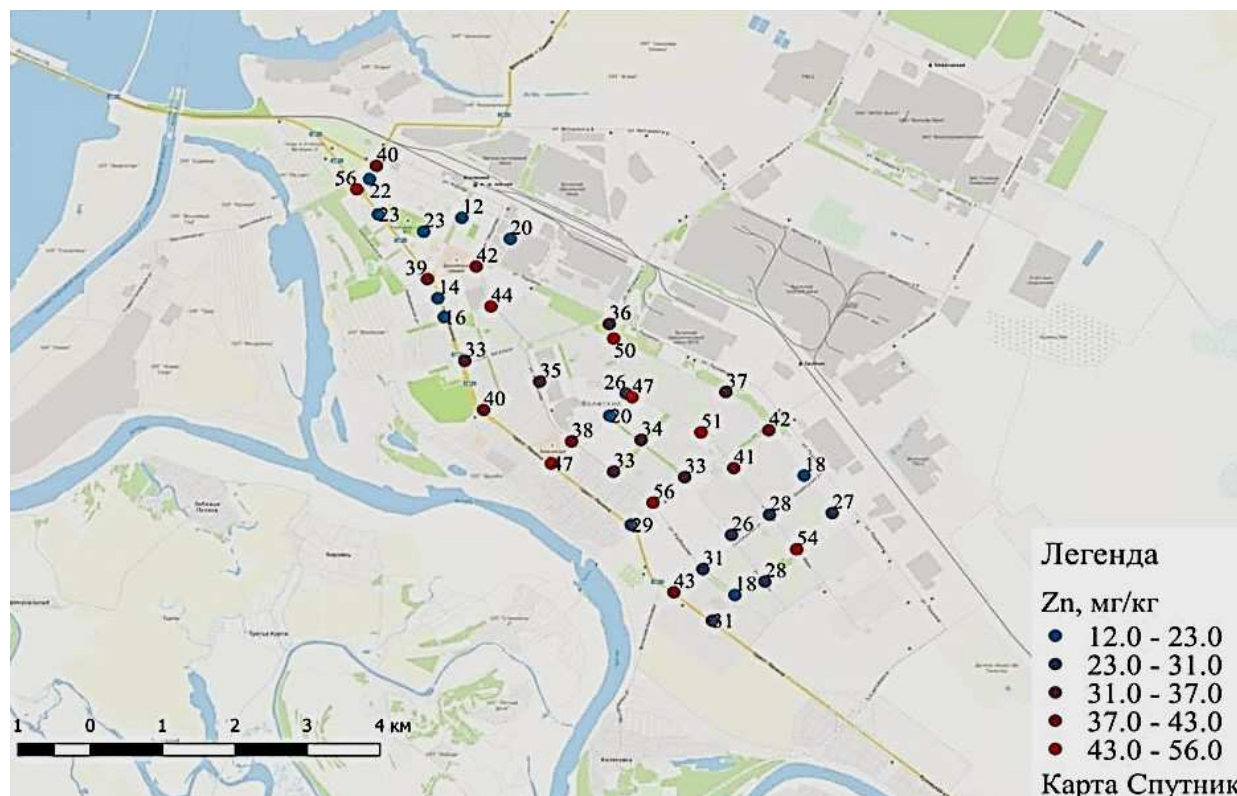
Содержание кадмия в почве вблизи автомобильных дорог г. Волжского составляет 0,001–0,8 мг/кг. Среднее значение равно 0,129 мг/кг. Превышения ОДК валовых форм кадмия (2 мг/кг) не было обнаружено ни на одной пробной площадке.

Корреляционный анализ не выявил статистически значимой связи между концентрациями цинка и кадмия в почве вблизи автомобильных дорог г. Волжского. Очевидно, что факторы, определяющие пространственное распределение концентраций цинка в придорожной почве г. Волжского, значимо отличаются от тех факторов, которые влияют на распределение концентраций кадмия.

На тех же участках улично-дорожной сети, где были отобраны пробы почв, проведена оценка интенсивности движения автомобильного транспорта. Интенсивность транспортного потока на выбранных участках варьировала от 486 до 4908 автомобилей в час. Наиболее загруженными являются пр. Ленина, ул. им. генерала Карбышева, ул. Мира, ул. Александра.

Проанализированы характер и степень взаимосвязи между концентрацией тяжелых металлов в почве и интенсивностью автотранспортного потока на дорогах г. Волжского. По цинку выявлено наличие статистически значимой положительной связи. Рассчитанный коэффициент корреляции составил $r = +0,395$ ($p < 0,05$). Небольшое значение коэффициента корреляции можно объ-

яснить тем, что на концентрацию тяжелых металлов в почве вблизи автомобильных дорог оказывает влияние множество факторов. Помимо интенсивности потока машин, к таким факторам относятся возраст застройки, уровень озеленения участка, скорость движения машин, тип зданий вдоль дороги, направление ветровых потоков, дренаж талого и дождевого стока. Указанные факторы могут перекрывать влияние фактора интенсивности движения на концентрацию тяжелых металлов в почве.



Концентрация цинка в почве вдоль автомобильных дорог г. Волжского
/ The concentration of zinc in the soil along the roads of the city of Volzhskiy

Кроме того, такой показатель, как интенсивность движения автомобильного транспорта, подвержен временной динамике. Это значит, что те участки улично-дорожной сети, которые на данный момент характеризуются высокой интенсивностью потока, в прошлом могли иметь гораздо меньшую интенсивность движения, и наоборот. При этом концентрация металла в почве отражает именно многолетнее его поступление.

Между концентрацией кадмия в почве и интенсивностью автотранспортного потока не выявлено статистически значимой связи. Это может свидетельствовать о том, что поступление кадмия в почву вблизи дорог г. Волжского происходит не только от движущегося транспорта, но и от других источников. К таким источникам относятся предприятия металлургии, авторемонтные мастерские, автозаправочные станции, автомобильные стоянки [27].

Кроме того, не только интенсивность движения автомобильного транспорта, но и структура потока машин влияет на характер выброса загрязняющих веществ. Известно, что кадмий входит в состав дизельного топлива. Поэтому выбросы от автомобилей, работающих на дизельном топливе (грузовые и автобусы), могут являться значимым источником загрязнения почвы кадмием на придорожных участках. В связи с этим в данной работе проведен анализ связи между концентрацией кадмия в почве и суммарной интенсивностью движения грузовых автомобилей и автобусов на дорогах г. Волжского. Выявлено наличие статистически значимой положительной связи – коэффициент корреляции составил $r = +0,301$ ($p < 0,1$). То есть в г. Волжском та часть поступления кадмия в почву, которая обусловлена движением автомобильного транспорта, связана в первую очередь с автомобилями, работающими на дизельном топливе. Следует отметить, что коэффициент корреляции для цинка, рассчитанный по всему транспортному потоку ($+0,390$,

$p < 0,05$), почти не отличается от коэффициента корреляции, рассчитанного только по грузовикам и автобусам ($+0,376$, $p < 0,05$).

Таким образом, вблизи автомобильных дорог с интенсивным движением транспорта концентрация цинка в почве больше, чем на менее загруженных дорогах (табл. 1). Для кадмия такой зависимости не выявлено, если учитывать весь транспортный поток. Однако установлено, что вблизи автомобильных дорог с интенсивным движением грузовых автомобилей и автобусов концентрация кадмия в почве больше, чем на дорогах, менее загруженных этим видом транспорта.

Таблица 1 / Table 1

Концентрация цинка и кадмия в почве вдоль дорог города Волжского с разной интенсивностью транспортного потока / The concentration of zinc and cadmium in the soil along the roads of the city of Volzhsky with different intensity of the traffic flow

Концентрация в почве, мг/кг	Интенсивность автотранспортного потока, авто/ч			
	>3000	2000–3000	1000–2000	<1000
Цинк	36,0	34,6	28,0	27,43
Кадмий	0,125	0,089	0,179	0,048

На тех же участках улично-дорожной сети, где были отобраны пробы почв, проведена оценка уровня озеленения. Для выбранных придорожных участков рассчитан показатель доли территории, занятой древесной растительностью. Полученные значения уровня озеленения составили от 0,25 до 11 %. Высокий уровень озеленения характерен для автомобильных дорог в старой части города. Поскольку природно-ландшафтной основой территории г. Волжского является Заволжский полупустынный ландшафтный район, существует прямая связь между возрастом любого района города и уровнем его озеленения (в первую очередь – по древесной растительности). Также высокий уровень озеленения выявлен на дорогах, прилегающих к санитарно-защитным зонам промышленных предприятий г. Волжского (ул. Пушкина).

Проанализированы характер и степень взаимосвязи между концентрацией тяжелых металлов в почве и уровнем озеленения придорожных участков г. Волжского. По цинку выявлено наличие статистически значимой средней отрицательной связи. Рассчитанный коэффициент корреляции составил $r = -0,489$ ($p < 0,01$). Таким образом, при увеличении уровня озеленения придорожных участков происходит снижение концентрации цинка в почве. На слабоозелененных площадках концентрация цинка в почве возрастает. Растения задерживают тяжелые металлы, выбрасываемые автотранспортом в атмосферный воздух, предотвращая их поступление в почву.

Полученное в данном исследовании небольшое значение коэффициента корреляции можно объяснить тем, что влияние фактора озеленённости территории может перекрываться влиянием других факторов, что усложняет выявление четких взаимосвязей. Результаты аналогичных исследований, проведенных в других городах, подтверждают это. Например, особенности рельефа местности могут быть причиной того, что на участках с более высоким уровнем озеленения фиксируются более высокие концентрации тяжелых металлов в почве, чем на менее озелененных участках [9].

Кроме того, на придорожных участках, где посажены деревья, проводятся работы по уходу за растениями: орошение, вспашка и внесение удобрений. Следствием этих работ является перемещение слоев почвы. В результате изменяется характер распределения тяжелых металлов в почве. Все это приводит к тому, что связь между показателем озеленения придорожных участков и концентрацией тяжелых металлов в поверхностном слое почвы становится менее очевидной и менее значимой.

Между концентрацией кадмия в почве и уровнем озеленения придорожных участков не выявлено статистически значимой связи. Зеленые насаждения вдоль дорог защищают прилегающие участки в первую очередь от выбросов движущегося автотранспорта. Если предположить, что загрязнение почвы кадмием на придорожных участках в г. Волжском связано не только с движением транспорта, но и с другими источниками, то уровень озеленения дорог не должен значимо влиять на концентрацию кадмия в почве вблизи автомобильных дорог. Аналогичные результаты – отсутствие связи между озеленением и концентрацией кадмия в придорожной почве и наличие такой связи по другим металлам – получены и в других исследованиях [9].

Чем больше возраст городского района, тем больше тяжелые металлы накапливаются в почве. В связи с этим проведен сравнительный анализ уровня загрязнения почвы тяжелыми металлами в районах г. Волжского с различным возрастом (дата застройки) (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Концентрация цинка и кадмия в придорожной почве в районах г. Волжского с различным возрастом / The concentration of zinc and cadmium in the roadside soil in the areas of the city of Volzhsky with different ages

Концентрация в почве, мг/кг	Дата застройки районов г. Волжского		
	1950–1970 гг.	1970–1990 гг.	После 1990 г.
Цинк	30,6	36	32,87
Кадмий	0,125	0,074	0,273

Установлено, что в тех районах города, которые построены первыми (1950–1970 гг.), концентрации цинка и кадмия в придорожной почве меньше, чем в более молодых районах. Подобная ситуация возможна, когда поверхностный слой придорожной почвы периодически заменяется – в результате снятия, засыпки или перемешивания. В селитебной зоне такая замена может происходить регулярно в процессе строительства зданий, ремонта подземных коммуникаций, ухода за придорожными растениями. Кроме того, старая часть г. Волжского характеризуется гораздо более высоким уровнем озеленения, чем новая. То есть в данном случае фактор возраста застройки и фактор озеленения изменяют концентрации тяжелых металлов в почве в противоположных направлениях.

Таким образом, концентрация тяжелых металлов в почве вблизи автомобильных дорог зависит от множества факторов. Влияние одних факторов перекрывается влиянием других, что усложняет выявление четких взаимосвязей. В некоторых научных работах изучение факторов, влияющих на концентрации тяжелых металлов в придорожных почвах, проводится в пределах только одной автомобильной дороги (автомагистрали) [9, 10, 25]. Такой подход позволяет уменьшить число влияющих факторов, от которых зависит пространственное распределение концентраций тяжелых металлов. Одна автомагистраль на всем своем протяжении, как правило, характеризуется однородностью такого фактора, как возраст (продолжительность периода эксплуатации). В некоторых случаях и уровень озеленения несильно варьирует в пределах одной магистрали. Поэтому в данном исследовании проанализирован характер связи между концентрацией цинка в почве и интенсивностью автотранспортного потока для наиболее протяженной и загруженной автомобильной дороги г. Волжского – пр. Ленина. Рассчитанный коэффициент корреляции составил $r = +0,580$ ($p < 0,1$). То есть анализ, проведенный по отдельной дороге, выявил более высокий уровень связи, чем общегородской анализ дорожно-транспортной сети.

Выводы

Проанализирован характер загрязнения цинком и кадмием придорожной почвы г. Волжского. Превышений ориентировочно допустимых концентраций валовых форм цинка и кадмия в почве не обнаружено. Концентрация цинка в почве вблизи автомобильных дорог г. Волжского не коррелирует с концентрацией кадмия. Изучено влияние интенсивности и структуры транспортного потока, уровня озеленения и возраста застройки на пространственную динамику концентраций цинка и кадмия в почве. Вблизи автомобильных дорог с интенсивным движением транспорта концентрация цинка в почве больше, чем на менее загруженных дорогах. Концентрация кадмия в почве выше вдоль дорог, где в структуре транспортного потока велика роль грузовых автомобилей и автобусов. Придорожные участки с более высоким уровнем озеленения характеризуются меньшими концентрациями цинка в почве. Не обнаружена связь между возрастом застройки и концентрациями цинка и кадмия в придорожной почве. Концентрация тяжелых металлов в почве вблизи автомобильных дорог, по-видимому, зависит от множества факторов. Влияние одних факторов перекрывается влиянием других, что усложняет выявление четких взаимосвязей.

Список источников

1. Дубинина М.Н., Горбов С.Н., Безуглова О.С., Шерстнев А.К. Содержание и профильное распределение валовых форм тяжелых металлов в почвах урбанизированных территорий Юга России // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2016. Т. 18, № 2-2. С. 349–354.
2. Налета Е.В., Капралова О.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Изменение биологических свойств почв крупных городов Ростовской области под влиянием загрязнения тяжелыми металлами // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 716.
3. Шишкина Д.Ю. Тяжелые металлы в почвах урболандшафтов г. Ростова-на-Дону // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 2. С. 101–105.
4. Синцов А.В., Бармин А.Н., Зимовец П.А., Валов М.В., Синцова Н.В. Геоэкологическая оценка современного содержания цинка в почвенном покрове урбанизированных территорий Юга России // Геология, география и глобальная энергия. 2021. № 3. С. 115–120.
5. Синцов А.В., Бармин А.Н., Зимовец П.А., Валов М.В., Синцова Н.В. Современное содержание тяжелых металлов в почве урбанизированных территорий Юга России // Геология, география и глобальная энергия. 2022. № 2. С. 103–109.
6. Петрова Е.Е., Райхерт Е.В. Загрязнение почв вблизи автомагистралей кадмием и цинком и их биологическое поглощение яровой пшеницей (в условиях Алейского района Алтайского края) // Изв. АлтГУ. 2013. № 3 (79). С. 44–48.
7. Заикина В.Н., Околелова А.А., Кастерина Н.Г., Свиридова Ю.А. Аккумуляция тяжелых металлов в светло-каштановых и аллювиальных почвах агломерации Волгоград – Волжский // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2016. Т. 18, № 2-2. С. 364–368.
8. Lu Y., Gong Z., Zhang G., Burghardt W. Concentrations and chemical speciations of Cu, Zn, Pb and Cr of urban soils in Nanjing, China // Geoderma. 2003. Vol. 115, iss. 1-2. P. 101–111, [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00079-X).
9. Zhang F., Yan X., Zeng C., Zhang M., Shrestha S., Devkota L.P., Yao T. Influence of Traffic Activity on Heavy Metal Concentrations of Roadside Farmland Soil in Mountainous Areas // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2012. Vol. 9. P. 1715–1731, <https://doi.org/10.3390/ijerph9051715>.
10. Elnazer A.A., Salman S.A., Seleem E.M., Abu El Ella E.M. Assessment of Some Heavy Metals Pollution and Bioavailability in Roadside Soil of Alexandria-Marsa Matruh Highway, Egypt // Int. J. of Ecology. 2015. Vol. 2015. Article ID 689420. 7 p., <https://doi.org/10.1155/2015/689420>.
11. Yan G., Mao L., Liu Sh., Mao Y., Ye H., Huang T., Li F., Chen L. Enrichment and sources of trace metals in roadside soils in Shanghai, China: A case study of two urban/rural roads // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 631–632. P. 942–950, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.340>.
12. Adachi K., Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust // Environment Int. 2004. Vol. 30, iss. 8. P. 1009–1017, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.04.004>.
13. Councell T.B., Duckenfield K.U., Landa E.R., Callender E. Tire-wear particles as a source of zinc to the environment // Environmental Science and Technology. 2004. Vol. 38, № 15. P. 4206–4214, <https://doi.org/10.1021/es034631f>.
14. Winther M., Slentø E. Heavy Metal Emissions for Danish Road Transport // NERI Technical Report № 780. Roskilde, Denmark: Aarhus University, 2010.
15. Horstmeyer N., Huber M., Drewes J.E., Helmreich B. Evaluation of site-specific factors influencing heavy metal contents in the topsoil of vegetated infiltration swales // Sci Total Environ. 2016. Vol. 560. P. 19–28. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.051.
16. Chen X., Xia X., Zhao Y., Zhang P. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China // J. of Hazardous Materials. 2010. Vol. 181, iss. 1–3. P. 640–646, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.060>.
17. Ahmed F., Fakhruddin A.N.M., Imam M.D.T., Khan N., Khan T.A., Rahman Md.M., Abdullah A.T.M. Spatial distribution and source identification of heavy metal pollution in roadside surface soil: a study of Dhaka Aricha highway, Bangladesh // Ecol. Process. 2016. Vol. 5, № 2, <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0045-5>.
18. Peng C., Zhang K., Wang M., Wan X., Chen W. Estimation of the accumulation rates and health risks of heavy metals in residential soils of three metropolitan cities in China // J. of Environ. Sciences. 2022. Vol. 115. P. 149–161, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.07.008>.
19. Aslam J., Khan S.A., Khan S.H. Heavy metals contamination in roadside soil near different traffic signals in Dubai, United Arab Emirates // J. of Saudi Chemical Society. 2013. Vol. 17, iss. 3. P. 315–319, <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2011.04.015>.
20. Nabuloa G., Oryem-Origa H., Diamond M. Assessment of lead, cadmium, and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala City, Uganda // Environ. Res. 2006. Vol. 101. P. 42–52.
21. Bai J., Cui B., Wang Q., Gao H., Ding Q. Assessment of heavy metal contamination of roadside soils in Southwest China // Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 2009. Vol. 23. P. 341–347, <https://doi.org/10.1007/s00477-008-0219-5>.

22. Xie T., Wang M., Chen W., Uwizeyimana H. Impacts of urbanization and landscape patterns on the accumulation of heavy metals in soils in residential areas in Beijing // *J. Soils Sediments*. 2019. Vol. 19. P. 148–158, <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2011-6>.

23. Wang M., Liu R., Chen W., Peng C., Markert B. Effects of urbanization on heavy metal accumulation in surface soils, Beijing // *J. of Environ. Sciences*. 2018. Vol. 64. P. 328–334, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.11.026>.

24. Zehetner F., Rosenfellner U., Mentler A., Gerzabek M.H. Distribution of Road Salt Residues, Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons across a Highway-Forest Interface // *Water, Air and Soil Pollut.* 2009. Vol. 198. P. 125–132, <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9831-8>.

25. Róžański S., Jaworska H., Matuszczak K., Nowak J., Hardy A. Impact of highway traffic and the acoustic screen on the content and spatial distribution of heavy metals in soils // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017. Vol. 24. P. 12778–12786, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8910-z>.

26. Turer D., Maynard J.B., Sansalone J.J. Heavy Metal Contamination in Soils of Urban Highways Comparison Between Runoff and Soil Concentrations at Cincinnati, Ohio // *Water, Air and Soil Pollut.* 2001. Vol. 132. P. 293–314, <https://doi.org/10.1023/A:1013290130089>.

27. Скупин Л.Н., Ваймер А.А., Квашина Ю.А., Судякова И.К. Загрязнение кадмием и свинцом почв в зоне автомагистрали // *Плодородие*. 2007. № 3. С. 37–38.

References

1. Dubinina M.N., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Sherstnev A.K. Content and profile distribution of gross forms of heavy metals in the soils of the urbanized territories of the South of Russia. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;(2-2):349-354. (In Russ.).

2. Naleta E.V., Kapralova O.A., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Change of biological properties of soils of large cities of the Rostov region under the influence of heavy metal pollution. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2013;(6):716. (In Russ.).

3. Shishkina D.Yu. Heavy metals in soils of urban landscapes of Rostov-on-Don. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2015;(2):101-105. (In Russ.).

4. Sintsov A.V., Barmin A.N., Zimovets P.A., Valov M.V., Sintsova N.V. Geoecological assessment of the current zinc content in the soil cover of urbanized territories of Southern Russia. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, Geography and Global Energy*. 2021;(3):115-120. (In Russ.).

5. Sintsov A.V., Barmin A.N., Zimovets P.A., Valov M.V., Sintsova N.V. Modern content of heavy metals in the soil of urbanized territories of Southern Russia. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, Geography and Global Energy*. 2022;(2):103-109. (In Russ.).

6. Petrova E.E., Raykhert E.V. Contamination of soils near highways by cadmium and zinc and their biological uptake by spring wheat (in the Aley district of the Altai region). *Izvestiya AltGU = Izvestiya of Altai State University*. 2013;(3):44-48. (In Russ.).

7. Zaikina V. N. Heavy metal accumulation in light chestnut and alluvial agglomeration soils Volgograd-Volzhskiy. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(2-2):364-368. (In Russ.).

8. Lu Y., Gong Z., Zhang G., Burghardt W. Concentrations and chemical speciations of Cu, Zn, Pb and Cr of urban soils in Nanjing, China. *Geoderma*. 2003;115(1-2):101-111, [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00079-X).

9. Zhang F., Yan X., Zeng C., Zhang M., Shrestha S., Devkota L.P., Yao T. Influence of Traffic Activity on Heavy Metal Concentrations of Roadside Farmland Soil in Mountainous Areas. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2012;(9):1715-1731, <https://doi.org/10.3390/ijerph9051715>.

10. Elnazer A.A., Salman S.A., Seleem E.M., Abu El Ella E.M. Assessment of Some Heavy Metals Pollution and Bioavailability in Roadside Soil of Alexandria-Marsa Matruh Highway, Egypt. *International Journal of Ecolog.* 2015;2015:689420:7, <https://doi.org/10.1155/2015/689420>.

11. Yan G., Mao L., Liu Sh., Mao Y., Ye H., Huang T., Li F., Chen L. Enrichment and sources of trace metals in roadside soils in Shanghai, China: A case study of two urban/rural roads. *Science of the Total Environment*. 2018;631-632:942-950, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.340>.

12. Adachi K., Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environment International*. 2004;30(8):1009-1017, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.04.004>.

13. Councell T.B., Duckenfield K.U., Landa E.R., Callender E. Tire-wear particles as a source of zinc to the environment. *Environmental Science and Technology*. 2004;38(15):4206-4214, <https://doi.org/10.1021/es034631f>.

14. Winther M., Slentø E. Heavy Metal Emissions for Danish Road Transport. *NERI Technical Report No. 780*. Roskilde, Denmark: Aarhus University Press; 2010.

15. Horstmeyer N., Huber M., Drewes J.E., Helmreich B. Evaluation of site-specific factors influencing heavy metal contents in the topsoil of vegetated infiltration swales. *Sci Total Environ.* 2016;560:19-28, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.051.

16. Chen X., Xia X., Zhao Y., Zhang P. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials.* 2010;181(1-3):640-646, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.060>.

17. Ahmed F., Fakhruddin A.N.M., Imam M.D.T., Khan N., Khan T.A., Rahman Md.M., Abdullah A.T.M. Spatial distribution and source identification of heavy metal pollution in roadside surface soil: a study of Dhaka Aricha highway, Bangladesh. *Ecol. Process.* 2016;5(2), <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0045-5>.

18. Peng C., Zhang K., Wang M., Wan X., Chen W. Estimation of the accumulation rates and health risks of heavy metals in residential soils of three metropolitan cities in China. *Journal of Environmental Sciences.* 2022;115:149-161, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.07.008>.

19. Aslam J., Khan S.A., Khan S.H. Heavy metals contamination in roadside soil near different traffic signals in Dubai, United Arab Emirates. *Journal of Saudi Chemical Society.* 2013;17(3):315-319, <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2011.04.015>.

20. Nabuloa G., Oryem-Origa H., Diamond M. Assessment of lead, cadmium, and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala City, Uganda. *Environ. Res.* 2006;101:42-52.

21. Bai J., Cui B., Wang Q., Gao H., Ding Q. Assessment of heavy metal contamination of roadside soils in Southwest China. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 2009;23:341-347, <https://doi.org/10.1007/s00477-008-0219-5>.

22. Xie T., Wang M., Chen W., Uwizeyimana H. Impacts of urbanization and landscape patterns on the accumulation of heavy metals in soils in residential areas in Beijing. *J. Soils. Sediments.* 2019;19:148-158, <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2011-6>.

23. Wang M., Liu R., Chen W., Peng C., Markert B. Effects of urbanization on heavy metal accumulation in surface soils, Beijing. *Journal of Environmental Sciences.* 2018;64:328-334, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.11.026>.

24. Zehetner F., Rosenfellner U., Mentler A., Gerzabek M.H. Distribution of Road Salt Residues, Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons across a Highway-Forest Interface. *Water, Air and Soil Pollut.* 2009;198:125-132, <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9831-8>.

25. Różański S., Jaworska H., Matuszczak K., Nowak J., Hardy A. Impact of highway traffic and the acoustic screen on the content and spatial distribution of heavy metals in soils. *Environ. Sci Pollut. Res.* 2017;24:12778-12786, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8910-z>.

26. Turer D., Maynard J.B., Sansalone J.J. Heavy Metal Contamination in Soils of Urban Highways Comparison Between Runoff and Soil Concentrations at Cincinnati, Ohio. *Water, Air & Soil Pollut.* 2001;132:293-314, <https://doi.org/10.1023/A:1013290130089>.

27. Skipin L.N., Vaymer A.A., Kvashnina Yu.A., Sudakova I.K. Cadmium and lead contamination of soils in the highways. *Plodorodie = Fertility.* 2007;(3):37-38. (In Russ.).

Информация об авторе

Д.С. Сухоносенко – кандидат географических наук, доцент, кафедра математики, информатики и естественных наук.

Information about the author

D.S. Suhonosenko - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Mathematics, Informatics and Natural Sciences.

Статья поступила в редакцию 12.02.2023; одобрена после рецензирования 05.03.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 12.02.2023; approved after reviewing 05.03.2023; accepted for publication 19.05.2023.

Научная статья

УДК 574.52

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-130-137

ХИМИКО-ТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И САНИТАРНО-БАКТЕРИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА И ПРЕДПРОЛИВНОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАЙОНА ПРОМЫШЛЕННОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МОЛЛЮСКОВ

Наталья Александровна Сытник

Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Республика Крым, Россия
amtek-kerch@mail.ru

Аннотация. Представлены химико-токсикологическая характеристика и санитарно-бактериологическое состояние морской среды Керченского пролива и предпроливья Чёрного моря. Были исследованы районы мысов Чауда, Опук, Кыз-Аул, с. Черноморское. В вышеуказанных районах определяли наиболее токсичные металлы – ртуть, мышьяк, медь, свинец, кадмий, хром, цинк, хлорорганические соединения. Приведены материалы по содержанию токсикантов в морской воде и донных отложениях рассматриваемого района.

Концентрации исследуемых тяжелых металлов в морской воде в основном не превышали ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Исключение составили районы мысов Опук, Кыз-Аул и Чауда, где выявлены превышения ПДК ртути, хрома и меди.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что наименее загрязнены тяжелыми металлами донные отложения в районе м. Опук, в большей степени – районы мысов Чауда и Кыз-Аул. Проведено сравнение многолетних комплексных санитарно-микробиологических исследований морской среды в районах размещения мидийных плантаций с показателями других акваторий Керченского пролива. Приводятся данные по обсемененности грунта гетеротрофной микрофлорой на морском дне под мидийными коллекторами.

На основе проведенных исследований химико-токсикологического и санитарно-микробиологического состояния морской среды сделаны выводы о возможности промышленного культивирования моллюсков в акватории Керченского пролива и предпроливья Чёрного моря.

Ключевые слова: Керченский пролив, Черное море, мидия, культивирование, тяжелые металлы, токсиканты, санитарно-бактериологическое состояние

Для цитирования: Сытник Н.А. Химико-токсикологическая характеристика и санитарно-бактериологическое состояние морской среды Керченского пролива и предпроливной зоны Черного моря как потенциального района промышленного культивирования моллюсков // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 130–137.

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

Original article

CHEMICAL-TOXICOLOGICAL CHARACTERISTICS AND SANITARY-BACTERIOLOGICAL CONDITION OF THE MARINE ENVIRONMENT OF THE KERCH STRAIT AND THE PRE-STRAIT ZONE OF THE BLACK SEA AS A POTENTIAL AREA OF INDUSTRIAL CULTURATION OF MOLLUSCS

Natalya A. Sytnik

*Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
amtek-kerch@mail.ru*

Abstract. *The chemical-toxicological characteristics and sanitary-bacteriological condition of the marine environment of the Kerch strait and the foreshore of the Black sea are presented. The districts of cape Chauda, Kyz-Aul, Opuk, v. Chernomorskoe. In the above areas, the most toxic metals were determined - mercury, arsenic, copper, lead, cadmium, chromium, zinc, chloroorganic compounds.*

The concentrations of the studied heavy metals in the marine water in the osnooutside did not exceed the MPC for fisheries in the fishery. The exception was made by the districts of cape Opuk, Kyz-Aul, Chauda, where excesses of MPC concentrations of mercury, chromium and copper were found.

Comparative analysis of the obtained results showed that the least polluted with heavy metals are the bottom osols in the area of c. Opuk, to a greater extent the districts of c. Chauda and Kyz-Aul.

The data were analyzed and a comparative analysis of long-term comprehensive sanitary and microbiological studies of the marine environment in the areas of mussel plantations with indicators of other water areas of the Kerch Strait was carried out. Data on soil contamination with heterotrophic microflora on the seabed under mussel collectors are given.

Based on the studies of the chemical-toxicological and sanitary-microbiological condition of the marine environment, conclusions were drawn about the possibility of industrial cultivation of mollusks in the waters of the Kerch Strait and the foreshore of the Black Sea.

Keywords: *Kerch Strait, Black Sea, mussel, cultivation, heavy metals, toxicants, sanitary-bacteriological condition*

For citation: Sytnik N.A. Chemical-Toxicological Characteristics and Sanitary-Bacteriological Condition of the Marine Environment of the Kerch Strait and the Pre-Strait Zone of the Black Sea as a Potential Area of Industrial Culturation of Molluscs. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):130-137. (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

Актуальная задача, стоящая перед современной наукой и практикой в области рыбного хозяйства, – расширенное воспроизводство биологических ресурсов в пресных и морских водоемах. Исходя из современного состояния и тенденций развития, получение необходимых биоресурсов из Мирового океана большинство ученых связывает с развитием аквакультуры промысла [1–4]. Фактическим подтверждением вышесказанного является увеличение объемов выращивания гидробионтов с 13 (в 1990 г.) до 114,5 млн т (в 2018 г.), что во многом связано с марикультурой (рис. 1).

Марикультура (морская аквакультура) – это многофункциональный комплекс биотехнологий по производству и переработке ценных морских животных и растений. Ежегодный прирост мировой продукции этой отрасли пищевой промышленности составляет 10–15 %. Доля продукции марикультуры (в первую очередь двустворчатые и брюхоногие моллюски) в будущем имеет тенденцию к увеличению в связи с небольшими затратами при культивировании. Россия серьезно отстаёт от других стран в развитии аквакультуры. На её долю приходится только 3 % мирового улова. В мире аква- и марикультура бурно развивается и уже стала мощным альтернативным источником получения рыбопродукции, обеспечивающим до 40 % её рыночного оборота [5].

В условиях санкционного давления, которое испытывает наша страна, возросла необходимость импортозамещения. В значительной мере это коснулось аквакультуры. Усиление экономических санкций требует уточнения долгосрочных целей, стратегических задач, переоценки ресурсного потенциала и ресурсных ограничений, что обуславливает актуальность настоящих исследований.

Чёрное море по своему физико-географическому положению является одним из наиболее перспективных бассейнов для выращивания моллюсков. Благоприятные климатические условия, высокая трофность шельфовой зоны и наличие естественных (природных) популяций этих организмов, обеспечивающих морские хозяйства посадочным материалом, в значительной степени определяют повышенный интерес к проблеме промышленного выращивания морских гидробионтов [4].

Целью исследований являются химико-токсикологическая характеристика и санитарно-бактериологическое состояние морской среды Керченского пролива и предпроливья Черного моря как потенциальных районов строительства морской фермы для промышленного выращивания мидий.

Материал и методы исследования

Исследования проводились в шельфовой зоне Керченского пролива и предпроливья Черного моря (переходная зона южной части Керченского пролива в предпроливье (мысы Такиль и Кыз-Аул) и шельфовая зона от Кыз-Аул до Чауда (рис. 2)).



Рис. 1. Виды, производимые в мировой аквакультуре в наибольших объемах, тыс. т (по данным ФАО, 2018 г.) [5] / Fig. 1. Species produced in the world aquaculture in the largest volumes, thousand tons (according to FAO, 2018) [5]



Рис. 2. Исследуемая акватория для создания морской фермы по культивированию моллюсков от южной части Керченского пролива (оз. Тобичик) до мысов Такиль и Чауда [4] / Fig. 2. The investigated water area for the creation of a sea farm for the cultivation of mollusks from the southern part of the Kerch Strait (l. Tobichikto to c. Taquil and c. Chauda) [4]

Таблица 1 / Table 1

Сбор материала осуществляли путем полевых наблюдений и натурных испытаний. Количество станций: гидробиологических – 96, бентосных – 84. Объем собранного и обработанного материала представлен в табл. 1 [4].

Объем собранного и обработанного материала
 / Volume of collected material

Обработанные пробы	Количество
Фитопланктон	86
Зоопланктон	93
Токсикологические	408
Санитарно-бактериологические	287
Паразитологические	138

Результаты исследования

Разработка биотехники искусственного воспроизводства моллюсков основана на знании различных сторон экологии и физиологии мидий. При их культивировании очень важной проблемой является изучение естественной среды их обитания, особенно в условиях возрастающего антропогенного воздействия. Токсические вещества вызывают ослабление репродуктивной функции организма мидий, изменение энергетического метаболизма, нарушение окислительно-восстановительных процессов, приводя к нарушению жизнедеятельности, снижению скоростей оседания и роста личинок и спата, а также к неполноценности потомства [6–8]. В этой связи при выборе районов для размещения мидийных ферм необходимо учитывать величину и характер токсического загрязнения акватории, а также санитарно-бактериологическое состояние морской воды и моллюсков.

Химико-токсикологическое состояние морской среды Керченского пролива Черного моря. Были исследованы районы мысов Чауда, Кыз-Аул, Опук, с. Черноморское. В них определяли наиболее токсичные металлы – ртуть, мышьяк, медь, свинец, кадмий, хром, цинк, хлорорганические соединения (ХОС) – ДДТ и его метаболиты, α -, γ -ГХЦГ, полихлорированные бифенилы (ПХБ), нефтепродукты.

Для химико-токсикологической характеристики черноморских экосистем основным показателем загрязнения принято считать содержание нефтепродуктов в воде и донных отложениях. Для Керченского пролива эти оценки стали особо актуальными после аварии танкера в ноябре 2007 г. К февралю 2008 г. содержание малотрансформированной фракции нефтеуглеводородов в воде увеличилось и достигло максимума в сентябре – ноябре 2008 г. С марта 2009 г. их содержание устойчиво снижалось, и в сентябре был зафиксирован абсолютный минимум – 0,015–0,045 мг/л.

Последующие исследования ЮгНИРО подтвердили прогноз тенденции к снижению загрязнения донных отложений в Керченском проливе (рис. 3) [9].

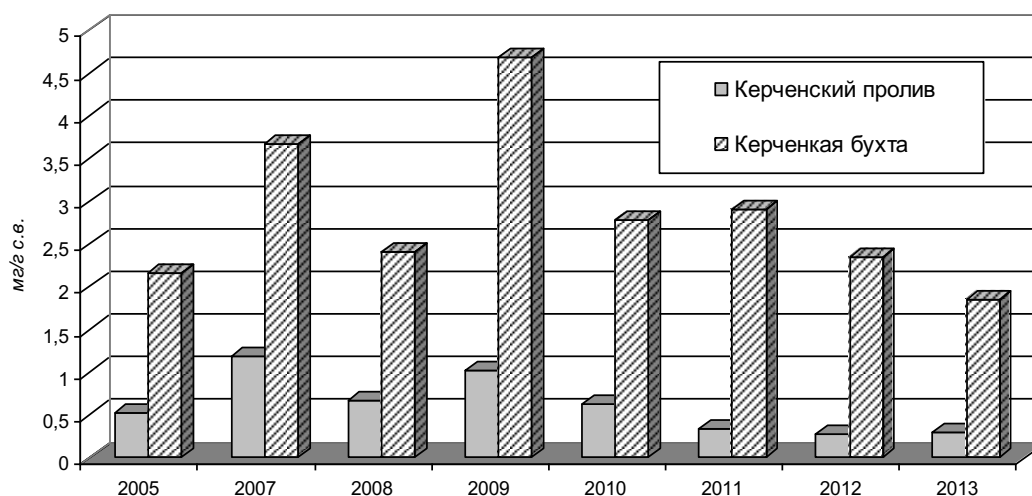


Рис. 3. Динамика содержания суммарных нефтепродуктов в донных отложениях Керченского пролива и Керченской бухты / Fig. 3. Dynamics of total petroleum products content in bottom sediments of the Kerch Strait and Kerch Bay

Концентрации исследуемых тяжелых металлов в морской воде в основном не превышали предельно допустимых концентраций (ПДК) для рыбохозяйственных водоемов (табл. 2). Исключение составили районы мысов Опук и Кыз-Аул, где количество ртути в воде в сентябре текущего года составило 1,6 и 2,9 ПДК соответственно, и районы м. Чауда, где содержание хрома превышало ПДК в 1,65 раза. Следует также отметить район с. Черноморское, в воде которого в сентябре концентрация меди несколько превысила ПДК – 5,39 мкг/л.

Таблица 2 / Table 2

**Концентрация токсичных металлов в морской воде в районе Керченского пролива
Черного моря, мкг/л / Concentration of toxic metals in the sea water near the Kerch Strait
of the Black Sea, mcg/L**

Район работ	Концентрация тяжелых металлов, мкг/л					
	Hg	As	Cu	Pb	Cd	Cr
Мыс Чауда	0,03	0,02	0,37	0,66	0,01	1,65
Село Черноморское	0,08	0,07	5,39	1,27	0,03	0,87
Мыс Опук	0,16	0,06	3,64	0,79	0,02	0,82
Мыс Кыз-Аул	0,29	0,05	4,06	0,89	0,02	0,68
ПДК	0,1	10,0	5,0	10,0	10,0	1,0

Данные по содержанию тяжелых металлов в донных отложениях исследуемых районов представлены в табл. 3. В связи с тем, что для донных отложений отсутствуют ПДК, сравнение содержания в них тяжелых металлов производилось с геохимическим фоном, характерным для Черного моря. Как видно из табл. 3, количество ртути, меди, свинца, кадмия и хрома во всех районах не превышало геохимического фона. В районах мысов Чауда, Кыз-Аул, с. Черноморское концентрация мышьяка в донных отложениях составила 19,24, 14,44 и 13,96 мкг/г сухого вещества, что превысило геохимический фон, составляющий 11 мкг/г сухого вещества. Сравнение полученных результатов показывает, что наименее загрязнены тяжелыми металлами донные отложения в районе м. Опук, в большей степени – мысов Чауда и Кыз-Аул. Принимая во внимание тот факт, что вода в районе м. Чауда была наиболее чистой в отношении большинства металлов, а донные отложения этого района наиболее загрязнены, можно предположить, что донные отложения в районе м. Чауда обладают большой сорбционной способностью, что в конечном итоге может привести к вторичному загрязнению воды.

Таблица 3 / Table 3

**Содержание токсичных веществ в донных отложениях в районе Керченского пролива
Черного моря, мкг/г сухого вещества / Toxic substances in bottom sediments in the area
of the Kerch Strait of the Black Sea, mcg / g dry substance**

Район работ	Концентрация тяжелых металлов, мкг/г с.в.					
	Hg	As	Cu	Pb	Cd	Cr
Мыс Чауда	0,21	19,24	3,53	8,16	0,05	10,26
Село Черноморское	0,03	14,44	3,78	7,99	0,002	7,87
Мыс Опук	0,04	9,65	1,62	2,13	0,001	9,93
Мыс Кыз-Аул	0,06	13,98	6,94	11,44	0,09	22,19
Геохимический фон	0,9	11	40	20	0,3	84

Вода в Керченском проливе Черного моря в августе была более загрязнена ХОС, чем в сентябре. Так, средняя концентрация ХОС составляла 0,024 мкг/л в августе и 0,010 мкг/л – в сентябре (табл. 4). По-видимому, это связано с различным количеством взвеси, попавшей в воду. Полихлорбифенилы содержались почти на всех станциях этого района, за исключением станции у м. Кыз-Аул. Их концентрация изменялась от 0,013 мкг/л до отсутствия в августе и 0,004 мкг/л – в сентябре. Причем в сентябре бифенилы были обнаружены только в пробе, взятой у горы Опук.

Пределы изменений концентраций соединений дихлордифенилтрихлорэтана (ДЦТ) составляли 0,014 до значения «следы» в августе и 0,004 – в сентябре. Из других компонентов ХОС наиболее мал диапазон изменения концентраций изомеров ГХЦГ. По-видимому, это связано с тем, что их содержание в меньшей степени зависит от количества взвеси.

В грунтах исследуемого района среднее содержание ХОС составляло 0,058 мкг/г сухого вещества. Из всех компонентов ХОС наиболее высокие концентрации были у ДДТ, что характерно для донных отложений. На всех станциях района в грунтах отмечались ПХБ. Их концентрация составляла в среднем 0,006 мкг/г сухой массы. Наиболее высокие значения этого параметра отмечались в грунтах, взятых у м. Кыз-Аул, наименьшие – у м. Чауда.

В целом по большинству тяжелых металлов, в наибольших количествах определенных в мягких тканях мидий, выделился район м. Чауда. Следует также подчеркнуть общую для всех районов закономерность: мидии, живущие на больших глубинах, содержат исследуемых металлов больше, чем мелководные. Концентрации тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков значительно ниже ПДК [4].

Таблица 4 / Table 4

**Распределение ХОС, мкг/л, в морской среде в районе Керченского предпроливья Черного моря
 / Distribution of organochlorine compounds in the marine environment in the area
 of the Kerch Strait of the Black Sea, mcg/L**

Район сбора проб	Август							Сентябрь						
	ДДТ и его метаболиты			Изомеры ГХЦГ		ПХБ	Σ ХОС	ДДТ и его метаболиты			Изомеры ГХЦГ		ПХБ	Σ ХОС
	ДДТ	ДДД	ДДЭ	α	γ			ДДТ	ДДД	ДДЭ	α	γ		
Гора Опук	0,002	0,0004	0,014	0,003	0,003	0,006	0,028	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,004	0,014
Мыс Чауда	0,004	Следы	0,002	0,003	0,002	0,005	0,016	0,004	0,003	0,0001	0,002	0,003	–	0,010
Мыс Кыз-Аул	0,014	0,003	0,007	0,003	0,004	–	0,031	0,004	0,002	0,001	0,002	0,002	–	0,011
Село Черноморское	Следы	Следы	0,003	0,003	0,002	0,013	0,021	0,002	Следы	Следы	0,002	0,002	–	0,005
Среднее	–	–	–	–	–	–	0,024	–	–	–	–	–	–	0,010
Грунт, мкг/г сух. в.														
Гора Опук	0,057	0,006	0,004	0,001	0,001	0,004	0,073	–	–	–	–	–	–	–
Мыс Чауда	0,024	0,004	0,003	0,0005	0,001	0,0004	0,033	–	–	–	–	–	–	–
Мыс Кыз-Аул	0,050	0,003	0,006	0,0009	0,002	0,012	0,074	–	–	–	–	–	–	–
Село Черноморское	0,039	0,006	0,003	0,0006	0,001	0,001	0,051	–	–	–	–	–	–	–
Среднее	–	–	–	–	–	–	0,058	–	–	–	–	–	–	–

Санитарно-бактериологическое состояние морской воды и моллюсков является важнейшей характеристикой акватории, предназначенной для культивирования. Многолетний анализ микробиологических проб воды и моллюсков, проводимый с 1980 по 2006 г., указывает на удовлетворительное санитарное состояние исследуемых акваторий Керченского пролива и предпроливья, где проводилось выращивание мидий.

Исследование сапрофитной (мезофильной и психрофильной), санитарно-показательной, патогенной и условно патогенной микрофлоры не выявило сколько-нибудь существенной контаминации, превышающей ПДК микроорганизмов для принятых санитарно-гигиенических норм в Минздраве РФ [10, 11].

На протяжении всего периода исследований в районах мидиевых плантаций патогенной микрофлоры (сальмонеллы, шигеллы, стафилококки, парагемолитические, альгинолитические, неагглютинирующие и холерные вибрионы) не обнаружено (табл. 5).

Обсемененность морской воды сапрофитными и кишечными бактериями обычно не превышала норму: мезофильные и психрофильные в среднем, соответственно, составляли 130–800 и 480–2870 кл/мл, причем наиболее высокие показатели имели место лишь в течение 2 мес. – с июня по август, в период максимального прогрева воды (24–26 °С).

В зимнее время участки для культивирования мидии можно охарактеризовать как ксеносапробные, тогда как в остальные месяцы года – олигосапробные. Практически на протяжении всего года имеет место заметное превалирование автохтонных микроорганизмов над бактериями

теригенового (антропогенного) происхождения. В частности, количество психрофильных и психротолерантных морских микробов, как правило, в 6 и более раз превышало число мезофильных аллохтонных организмов.

Таблица 5 / Table 5

Основные санитарно-микробиологические показатели морской воды Керченского пролива в районах установки мидийных плантаций / Main sanitary and microbiological indicators of the sea water of the Kerch Strait in the areas where mussel plantations are installed

Время исследования	Кол-во аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов ($M \pm m$), кл/мл		Пробы с коли-индексом:	
	Мезофильные	Психрофильные	Менее 4,5	От 4,5 по 60*
Зимние месяцы	72,5±32,7	483±116,7	56,2	43,8
Март	120 ±26,3	2981,3±391,8	50,0	50,0
Апрель	108,2±3,8	1114,3±292,9	14,3	85,7
Май	130,3±50,9	1043,3±108,8	11,1	88,9
Июнь	853,0±325,2	2414,0±701,7	20,0	80,0
Август	860,0±81,5	2872,5±524,1	18,2	81,8

Эти данные свидетельствуют о том, что в воде пролива идут микробиологические процессы, связанные с деструкцией и минерализацией органического вещества [12, 13], что является важным фактором самоочищения морской воды от антропогенного загрязнения. Споровая аэробная микрофлора присутствует в Керченском проливе круглый год, варьируя в пределах 10–300 кл/мл [14].

Анализ санитарно-микробиологического состояния культивируемых мидий показал, что районы выращивания мидии в Керченском проливе и предпроливье благоприятны для мариккультуры мидий. Спор сульфитредуцирующих кластридий в 1 г мидий не обнаружено ни в одной из исследованных проб [4].

В основном повышенная бактериальная контаминация наблюдается в водах, прилегающих к городской черте, но там культивирование моллюсков не проводится.

Выводы

Химико-токсикологическое и санитарно-микробиологическое состояние морской среды в районе Керченского предпроливья Черного моря находится в пределах, характерных для Черного моря, и не противоречит санитарно-гигиеническим требованиям РФ. Мидии, являющиеся индикаторами загрязнения среды, накапливают токсичные вещества в меньших количествах в районе южнее мыса Такиль и подтверждают вывод, что среда обитания для мидий с токсикологической точки зрения более благоприятна в южной части Керченского пролива. Поэтому исследуемые районы можно рекомендовать для размещения марихозяйств по промышленному культивированию моллюсков.

Список источников

1. Губанов Е.П., Масюткин Е.П., Панов Б.Н., Битюцкая О.Е. Возрождение рыбохозяйственной отрасли Крыма. Основные направления и задачи научно-технического обеспечения // Рыбн. хоз-во. 2014. № 2. С. 15–18.
2. Fishery and Aquaculture Statistics // FAO of the United Nations. Rome, 2010. 74 p.
3. Encyclopedia of Aquaculture / R.R. Stickney, ed. N.Y., 2000. 1064 p.
4. Сытник Н.А. Химико-токсикологическая характеристика и санитарно-бактериологическое состояние морской среды и моллюсков Керченского пролива и предпроливья Чёрного моря // Вестн. Керченского гос. морского технол. ун-та. 2019. Вып. 4. С. 26–42. URL: <https://onedrive.live.com/?authkey=%21AJLcWilbI8VxAEG&cid=645EA053FC5722E5&id=645EA053FC5722E5%211049&parId=645EA053FC5722E5%21310&o=OneUp> (дата обращения: 20.10.2022).
5. Fishery and Aquaculture Statistics 2018 // FAO of the United Nations. Rome, 2019. 198 p.
6. Доценко И.В. Оценка осаждения тяжелых металлов черноморской мидией (*Mytilus galloprovincialis* Lam.) в морских акваториях: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д., 2005.
7. Дехта В.А., Дудкин С.И., Каталевский Н.И., Кузина В.Ф. Биомониторинг черноморского побережья по параметрам консервативной и лабильной изменчивости поселений мидии // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна : сб. науч. трудов АзНИИРХ (2000–2001 гг.). Ростов н/Д., 2002. С. 71–81.

8. Павлова Е.С. Экологические аспекты накопления металлов в моллюсках: дис. ... канд. биол. наук. М., 1988. 156 с.
9. Петренко О.А., Жугайло С.С., Авдеева Т.М. Результаты многолетних исследований уровня загрязнения морской среды Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна // Тр. ЮгНИРО. 2015. Т. 53. С. 4–18.
10. Лабинская А.С. Руководство по медицинской микробиологии. М.: Бином, 2010. 1152 с.
11. Чурбанова И.Н. Микробиология. М.: Высшая школа, 1987. 240 с.
12. Крючков В.Г. Создание хозяйств марикультуры в прибрежных акваториях Чёрного моря // Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане. 2011. Т. 49. С. 72–77.
13. Троценко Б.Г., Солодовников А.А. Проблемы и перспективы развития аквакультуры в Крыму // Рыбн. хоз-во Украины. 2006. № 5/6. С. 41–46.
14. Шурова Н.М. Структурно-функциональная организация популяции мидий *Mytilus galloprovincialis* Черного моря: дис. ... д-ра биол. наук. Севастополь, 2009. 379 с.

References

1. Gubanov E.P. Masyutkin E.P. Panov B.N. Bityutskaya O.E. The revival of the fish industry in the Crimea. Main lines and tasks of scientific and technical support. *Rybn. khoz-vo = Fisheries*. 2014;(2):15-18. (In Russ.).
2. Fishery and Aquaculture Statistics. *FAO of the United Nations*. Rome, 2010. 74 p.
3. Stickney R. R., ed. *Encyclopedia of Aquaculture*. New York, 2000. 1064 p.
4. Sytnik N.A. Chemical-toxicological characteristics and sanitary-bacteriological state of the marine environment and mollusks of the Kerch Strait and the Black Sea. *Vestn. Kerchenskogo gos. morskogo tekhnol. un-ta = Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2019;(4):26-42. Available from: <https://onedrive.live.com/?aukey=%21AJIcWilb18BxAEG&cid=645EA053FC5722E5&id=645EA053FC5722E5%211049&parId=645EA053FC5722E5%21310&o=OneUp> [Accessed 11th October 2022]. (In Russ.).
5. Fishery and Aquaculture Statistics 2018. *FAO of the United Nations*. Rome, 2019. 198 p.
6. Dotsenko I.V. *Evaluation of the deposition of heavy metals by Black Sea mussels (Mytilus galloprovincialis Lam.) in marine areas*. Dissertation. Rostov-on-Don, 2005. 194 p. (In Russ.).
7. Dekhta V.A., Dudkin S.I., Katalievskii N.I., Kuzina V.F. Biomonitoring of the Black Sea coastal area by parameters of conservative and labile variability of mussel settlement. *The main problems of fisheries and protection of fishery reservoirs of the Azov-Black Sea basin*. Collection of scientific works of the Azov-Black Sea branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography (2000-2001). Rostov-on-Don, 2002;(1):71-81. (In Russ.).
8. Pavlova E.S. *Ecological aspects of metal accumulation in mollusks*. Dissertation. Moscow, 1988. 156 p. (In Russ.).
9. Petrenko O. A., Zhugailo S. S., Avdeeva T. M. The results of multi-year studies of the level of pollution of the marine environment of the Azov-Black Sea fisheries basin. *Trudy YugNIRO = Proceedings of the Southern Research Institute of Fisheries and Oceanography*. 2015;53:4-18. (In Russ.).
10. Labinskaya A.S. *Guide to medical microbiology*. Moscow: Binom Publ.; 2010. 1152 p. (In Russ.).
11. Churbanova I.N. *Microbiology*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1987. 240 p. (In Russ.).
12. Kryuchkov V. G. Creation of mariculture farms in the coastal waters of the Black Sea. *Osnovnye rezul'taty kompleksnykh issledovaniy v Azovo-Chernomorskom basseine i Mirovom okeane = The main results of complex research in the Azov-Black Sea basin and the World Ocean*. 2011;49:72-77. (In Russ.).
13. Trotsenko B. G. Solodovnikov A. A. Problems and prospects of aquaculture development in the Crimea. *Rybn. khoz-vo = Fisheries*. 2006;(5/6):41-46. (In Russ.).
14. Shurkova N.M. *Structural and functional organization of the Black Sea mussel population Mytilus galloprovincialis*. Dissertation. Sevastopol, 2009. 379 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Н.А. Сытник – кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедрой экологии моря.

Information about the author

N.A. Sytnik - Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Marine Ecology.

Статья поступила в редакцию 23.10.2023; одобрена после рецензирования 25.12.2023; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 23.10.2023; approved after reviewing 25.12.2023; accepted for publication 19.05.2023.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 581.524.1/552:504.73

doi: 10.18522/1026-2237-2023-2-138-150

ВЛИЯНИЕ АЛЛЕЛОПАТИИ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ КАШТАНА ПОСЕВНОГО В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Виталий Георгиевич Щербина

Филиал Института природно-технических систем в г. Сочи, Сочи, Россия

v.g.scherbina@bk.ru

Аннотация. Влияние аллелопатии на начальных стадиях развития каштана посевного в зоне влажных субтропиков тесно связано с уровнем аллелопатического фона в биоценозе, зависящего от негативного антропогенного воздействия на природную среду. В ненарушенных или слабонарушенных местообитаниях каштана, в подкороновой зоне маточного дерева под воздействием комплекса активных прижизненных выделений из листьев и других надземных органов, поступающих с осадками в верхние горизонты почвы, семена каштана на этапе прорастания испытывают ингибирующее влияние (19,3–21,3 %), на стадии сеянцев – стимулирующее (11,7–30,4 %). Суммарный эффект действия колинов с участием сапролинов и миазминов ризосферы и лесной подстилки приводит, соответственно, к ингибированию всхожести на 71,0–72,6 % и стимуляции роста корней сеянцев на 32,0–40,1 %. С увеличением в лесном биоценозе индекса полевотолерантности в диапазоне 1,88–4,70, от очень чистой к чистой и «относительно чистой» среде, напряженность аллелопатического фона в сообществе последовательно снижается по мере наложения прогрессирующего рекреационного уплотнения почвы, угнетающе воздействуя на всхожесть каштана. Рост корней сеянцев, стимулируемый в очень чистой и чистой среде в диапазоне объемной массы почвы 0,70–1,24 г/см³, сменяется их угнетением в относительно чистой среде каштанового биоценоза.

Ключевые слова: каштан посевной, рекреационная нагрузка, техногенная нагрузка, всхожесть, всходы, аллелопатия, трансформация

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А16-116012510144-6 «Совершенствование механизма управления природопользованием с целью обеспечения эколого-экономической безопасности функционирования индустрии туризма».

Автор благодарен рецензенту за ценные рекомендации, направленные на улучшение статьи.

Для цитирования: Щербина В.Г. Влияние аллелопатии на начальных стадиях развития каштана посевного в условиях антропогенной нагрузки // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2023. № 2. С. 138–150.

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

Original article

INFLUENCE OF ALLELOPATHY AT THE INITIAL STAGES OF THE DEVELOPMENT OF THE SOWING CHESTNUT UNDER THE CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC LOAD

Vitaliy G. Scherbina

Branch of Institute of Natural and Technical Systems in Sochi, Sochi, Russia

v.g.scherbina@bk.ru

© Щербина В.Г., 2023

Abstract. *The magnitude of the influence of allelopathy at the initial stages of development of the sowing chestnut in the zone of humid subtropics is closely related to the level of the allelopathic background in the biocenosis, which is dependent on the negative anthropogenic impact on the natural environment. In undisturbed or slightly disturbed chestnut habitats, in the undercrown zone of the mother tree, under the influence of a complex of active intravital secretions from leaves and other aboveground organs that enter the upper soil horizons with precipitation, chestnut seeds at the germination stage experience an inhibitory effect (19.3-21.3 %), at the stage of seedlings – stimulating (11.7-30.4 %). The total effect of the action of colins with the participation of saprolines and miasmins of the rhizosphere and forest litter leads, respectively, to inhibition of germination by 71.0-72.6 % and stimulation of seedling root growth by 32.0-40.1 %. With an increase in the field tolerance index in the forest biocenosis in the range of 1.88-4.70, from “very clean” to “clean” and “relatively clean” environment, the intensity of the allelopathic background in the community consistently decreases as progressive recreational soil compaction accumulates, depressing on the germination of chestnut. The growth of seedling roots, stimulated in a “very clean” and “clean” environment in the range of soil volumetric mass of 0.70-1.24 g/cm³, is replaced by their inhibition in a “relatively clean” environment of chestnut biocenosis.*

Keywords: *sowing chestnut, recreational load, technogenic load, germination, seedlings, allelopathy, transformation*

Acknowledgments: *the work was carried out within the framework of the state assignment on the topic No. AAAA-A16-116012510144-6 “Improving the mechanism of environmental management in order to ensure the environmental and economic safety of the functioning of the tourism industry”.*

The author is grateful to the referee for valuable recommendations aimed at improving the article.

For citation: Scherbina V.G. Influence of Allelopathy at the Initial Stages of the Development of the Sowing Chestnut Under the Conditions of Anthropogenic Load. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2023;(2):138-150. (In Russ.).

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

Введение

Пригородные леса, выполняя функцию экологического каркаса городов [1], при хроническом рекреационном воздействии и возрастающем уровне загрязнения атмосферы [2] характеризуются измененными параметрами экотопа [3], снижением возобновительного потенциала [4], биоритмикой развития и динамикой роста организмов, усилением фрагментации лесных массивов и производности. Всё это отражается на видовом и структурном разнообразии [5, 6], средозащитных функциях лесных экосистем [7–9].

В нестабильной экологической ситуации находятся и современные леса рекреационно-туристской специализации в зоне влажных субтропиков России, насыщенные древними реликтовыми видами. Их состояние характеризуется значительной пространственной антропогенной гетерогенностью биоценологических условий среды [10], увеличением доли древостоев с пониженным жизненным состоянием [11, 12], снижением популяционной плотности и доли участка эндемичных и рецедентных видов, степенью устойчивости к внедрению инвазивных видов [13], рекреационной уязвимостью и низкой стабильностью сообществ [14–16]. По лесообразующей значимости выделяются сообщества с участием каштана посевного, выполняющие противозероэрозийные, водорегулирующие, водоохраные [17] и рекреационные функции, испытывая значительный антропогенный пресс [18]. По лесоводственным оценкам и структурно-пространственному распределению леса из каштана съедобного [19] характеризуются как сильно нарушенные, находящиеся под угрозой исчезновения. Успешное возобновление, расширение площади распространения отмечается только в районах, удаленных от селитебной зоны, труднодоступных для рекреантов из-за сложности рельефа и отсутствия дорог [19, 20]. Учет естественного семенного возобновления показывает, что по мере приближения к населенным пунктам на 69,5 % площади лесов возобновление отсутствует, на 2,8–19,4 – слабое, на 8,3–11,1 % – удовлетворительное [20, 21]. По разным оценкам, эффективность возобновления составляет от 0,01–0,02 до 2–8 % [22, 23].

Наиболее ответственным этапом в лесовозобновительном процессе считается начальная стадия развития из семян, определяемая высокой чувствительностью к изменяющимся факторам окружающей среды [24]. В качестве регулятора выступают положительные и отрицательные аллелопатические механизмы коммуникации на уровне растительных сообществ и экосистем [25, 26] через трансформацию абиотических [27, 28] и биотических факторов [29, 30], под контролем прямых и косвенных [26] конкурентных отношений [31, 32]. Установлена зависимость токсического действия аллелопатических веществ от скорости минерализации почвенными микроорганизмами, наличия и подвижности в почвенном профиле органических веществ [33], способности поглощаться растениями или выщелачиваться [34–36]. Всё это отражается на ингибировании прорастания семян и развитии проростков [37].

Основываясь на этих данных, можно предположить, что в рекреационно-туристской зоне влажных субтропиков наложение техногенного фактора на рекреационный может являться причиной снижения аллелопатического потенциала каштана, определяющего его стабильность и устойчивость насаждений к антропогенному воздействию, но подтверждающих это экспериментальных данных не выявлено.

Цель настоящих исследований – оценка участия аллелопатических механизмов на начальных стадиях развития из семян при комплексном рекреационном и техногенном воздействии на лесные сообщества каштанника колхидского. В задачи входило:

- экспериментально подтвердить или опровергнуть наличие аллелопатических механизмов в процессе прорастания семян каштана;
- определить аллелопатическое влияние лесной подстилки, корней и филлосферы на всхожесть и развитие всходов;
- определить суммарный эффект от действия водорастворимых колинов в антропогенно трансформированной среде.

Объекты и методы исследования

Фактический материал собирался в наиболее производительном типе каштановых лесов – каштаннике колхидском, занимающем по распространенности второе место по площади (25 %) после азалиевого [21]. В пределах пояса каштановых лесов этот тип чаще приурочен к высотам 200–600 м над уровнем моря [17], произрастает на сравнительно глубоких, светло-бурых, горнолесных почвах, сформированных на бескарбонатных глинистых и опесчаненных сланцах [38].

Пробные площади закладывались на участках лесного массива с различной рекреационной и техногенной нагрузкой в бассейнах рек Шахе и Уч-Дере. Ближайшие населенные пункты (0,5–4,5 км) – Солохаул и Нижнее Учдере. Насаждение смешанное, условно разновозрастное, сложное по форме, семенно-порошковое по происхождению, 4–6-го класса возраста, с коэффициентным участием каштана три единицы: 3Кш 2Бк 2Г 2Ол 1Кло + Дпуш, Лп ед. Ил, Тс, Клп, Чрш; 3Кш 3Бк 2Г 1Ол 1Кло + Яс, Лп, Дпуш ед. Грш. Кондоминантами являются *Castanea sativa* Mill. (Кш), *Fagus orientalis* Lipsky (Бк), *Carpinus betulus* L. (Г), *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. (Ол), *Acer platanoides* L. (Кло). До 5 % в составе древостоя участвуют *Quercus pubescens* Willd. (Дпуш), *Tilia caucasica* Rupr. (Лп), *Fraxinus excelsior* L. (Яс). Менее 2 % по запасу встречаются *Ulmus scabra* Mill. (Ил), *Taxus baccata* L. (Тс), *Acer campestre* L. (Клп), *Pyrus communis* L. (Грш), *Prunus avium* L. (Чрш). Видовая принадлежность высших растений определялась по таксономическим ключам [39].

В составе слабовыраженного подлеска и угнетенного живого надпочвенного покрова (степень покрытия $\leq 0,2$) наиболее часто (> 10 %) встречаются воронец колосовидный (*Actaea spicata* L.), копытень промежуточный (*Asarum intermedium* (C.A. Mey.) Grossh.), вороний глаз неполный (*Paris incompleta* M. Bieb.), плющ колхидский (*Hedera colchica* (K. Koch) K. Koch), волжанка обыкновенная (*Aruncus vulgaris* Raf.), тамус обыкновенный (*Tamus communis* L.), овсяница гигантская (*Festuca gigantea* (L.) Vill.), кирказон (*Aristolochia* sp.), горошек оранжевый (*Vicia crocea* (Desf.) Fritsch), трахистемон восточный (*Nordmannia orientalis* Stev.), волчегодник понтийский (*Daphne pontica* L.). Самосев и крупный подрост (от 1 до 10 лет) каштана – 128 особей на 6400 м² (0,02 тыс. шт/га), что по шкале успешности возобновления [24] оценивается как отсутствующее.

Последовательность исследования состояла из предварительного зонирования природной территории с составлением карт-схем техногенного и рекреационного воздействия, отбора полевых проб при различной интенсивности антропогенного воздействия для проведения опытов и проращивания семян в условиях лаборатории.

Для зонирования техногенной нагрузки проводилась качественная оценка атмосферного воздуха на трансектах (ширина 15 м, протяженность до 1,5 км) от автодороги или несанкционированной автостоянки по видовым классам полеотолерантности [40, с. 39–40] с применением лишеноиндикационного градиентного анализа [41]. Проективное покрытие (суммарное (c_i), относительное (C_i)) измерялось по доминирующим видам ($c_i \geq 100$ см) методом линейных пересечений на высоте 1,0 м от комля. Индекс полеотолерантности (IP) оценивался по шкале А.С. Боголюбова и М.В. Кравченко [42].

По доминирующим видам эпифитной лишенофлоры (*Hypogymnia tubulosa* (Schaer.) Nyl., *Parmeliopsis ambigua* (Wulfen.) Nyl., *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., *Physcia aipolia* (Ehrh.) Hampe, *Cetraria chlorophyll* (Willd.) Vain., *Lecanora allophane* (Ach.) Rohl., *Xanthoria polycarpa* (Hoffm.) Th. Fr. ex Rieber, *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Parmelia sulcata* Taylor), *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.) и расчетным значениям были определены три условные зоны (табл. 1) состояния воздушной среды: 1 – очень чистая; 2 – чистая; 3 – относительно чистая.

Таблица 1 / Table 1

Лишеноиндикация состояния воздушной среды в трех зонах леса
/ Lichens indication of the state of the air environment in three forest zones

Зона	Проективное покрытие			Полеотолерантность	
	c_i , см	C_i , %	C_n	A_i	IP
Очень чистая	910,2–2341,2	31,2–47,4	6–7	1–2	1,88–2,04
Чистая	731,7–1772,4	13,5–25,7	4–5	2–5	3,63–4,32
Относительно чистая	119,6–1576,1	7,2–15,0	3–4	4–7	5,68–6,70

Примечание. C_n – балл покрытия; A_i – класс полеотолерантности.

Зоны с различным рекреационным воздействием определялись по оголенной площади с дальнейшей оценкой стадий рекреационной дигрессии [43]. Выделены участки с I по V стадию с вариацией объемной массы почвы, г/см³, в 5 диапазонах: 0,68–0,98; 0,99–1,13; 1,14–1,19; 1,20–1,44; 1,45–1,70.

На участках леса с однотипными дигрессией и диапазоном техногенной нагрузки отбирались по пять модельных деревьев (диаметр 30–45 см), в подкороновой зоне – почвенные пробы (керны) цилиндрическим буром врезного типа [44] в верхнем горизонте (насадка \varnothing 5 см, $L = 10$ см; 4-кратная повторность), с последующим стандартным определением объемной массы почвы.

В лабораторных условиях семена и плоды по 30 шт. высевались в полимерных контейнерах (1570,8 см³) в 3-кратной повторности в промытый речной песок (размеры частиц – 0,5–0,8 мм). В полевых условиях высева семян по 4 шт. проводился в подкороновой зоне на учетных площадках (0,2×1,0 м; 5-кратная повторность) в лунки, образованные после отбора почвенных проб. Варианты опытов:

I. Посадка в песок; полив дистиллированной водой.

II. Посадка в песок; полив дождевой водой из подкороновой зоны с I по V стадию дигрессии.

III. Посадка в смесь песка и лесной подстилки, отобранной с I по V стадию дигрессии с площади \varnothing 15 см; полив дистиллированной водой.

IV. Посадка в смесь песка с корневыми остатками, отобранными с I по V стадию дигрессии из объема 1767,1 см³; полив дистиллированной водой.

V. Посадка в подкороновое пространство (5 диапазонов объемной массы почвы: 0,68–0,98; 0,99–1,13; 1,14–1,19; 1,20–1,44; 1,45–1,70; 3 варианта загрязнения атмосферы). Посадка в лунки, расширенные насадкой (\varnothing 15 см, $L = 10$ см), с мульчированием лесной подстилкой, собранной с площади под бур (\varnothing 15 см).

Посадка семян осуществлялась вдавливанием (трамбовкой) на глубину, равную их толщине. Полив субстрата (песок, почва) дождевой водой проводился один раз после посадки (объем 100 мл), что приближало концентрации выделенных соединений, определяющих аллелопатический эффект в эксперименте, к природным условиям [45]. Контейнеры закрывались прозрачной пленкой для предотвращения испарения и возможности проявления реакции летучих аллелопатически активных соединений.

Величина всхожести устанавливалась по числу проростков через 10 дней после начала опыта, что исключало ошибку учета в случае наложения порога чувствительности и гибели проростков в первые дни эксперимента [46]. Линейные размеры корней (длина) измерялись электронным штангенциркулем с точностью до 0,1 мм на 10-й день опыта.

За контроль (отсутствие аллелопатического действия) принимались проращиваемые семена в варианте опыта I. Факт воздействия суммы аллелохимикатов характеризовался результатами отклонения от контрольных по всхожести и длине корней, а также изменениями величин аллелопатического эффекта в пробах из антропогенно измененной среды.

Семенной материал каштана для проведения опытов собирался в начале октября 2021 г. в каштаннике колхидском при отсутствии хронического загрязнения воздушной среды (объемная масса верхнего горизонта почвы $\leq 0,98$ г/см³). До посадки (апрель 2022 г.), для возможности естественной потери колинов, семена хранились в свободном воздушном режиме – в теневой (прохладной) зоне на стеллажах без защиты от осадков.

Биологическое воздействие водорастворимых колинов почвы по рекомендациям А.М. Гродзинского [47] оценивалось в условных кумариновых единицах (УКЕ). Биотестом служил редис (*Raphanus sativus* var. *Radicula* Pers.) между 4 слоями бумаги, увлажнённой водной вытяжкой (1:1,5). Одна аналитическая проба (3-кратная повторность по 100 семян) готовилась из среднего образца почвы на учетную площадку. В качестве дистиллированной воды в лабораторных условиях использовалась дождевая вода, в полевых – речная из ближайшего горного источника.

Аллелопатическое действие рассчитывалось по индексу относительного аллелопатического эффекта (I_{RAE}) [48]: $I_{RAE} = \frac{I_0 - I_c}{I_c} \cdot 100$, где I_0 – проросшие семена (длина корней) в опыте; I_c – проросшие семена (длина корней) в контроле.

Объем вариационных рядов выборочных совокупностей вычислялся по П.Ф. Рокицкому [49] с превышением рассчитанных теоретически необходимых объемов (37,6 и 72,6 шт.), определяемых ожидаемой вероятностью результатов (p) в диапазоне от 0,95 ($t = 2$) до 0,997 ($t = 3$) при заданной точности $\Delta = 0,1$. Стандартное отклонение, заранее неизвестное, оценивалось по данным предыдущих исследований аллелопатической активности в профиле фитогенных полей [13, 16].

Достоверность разницы между выборками оценивалась по фактическому отклонению при значимости $P \leq 0,05$ с использованием t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера; статистически близкие повторности объединялись в одну выборочную совокупность. Характер связи определялся построением линейных и полиномиальных (вторая степень) моделей регрессии. Теснота связи оценивалась по скорректированному коэффициенту детерминации (R^2).

Результаты исследования

Проверка первичного материала на достоверность полученных результатов по нулевой гипотезе (равенство биотопов с различной загрязненностью атмосферы), а по показателю всхожести с использованием нормированного отклонения (t) выявила, что фактическое отклонение, соответствующее вероятности 0,866–0,941, ниже табличного ($t_{\text{факт.}} < t_{\text{табл.}}: 1,48 - 1,89 < 1,96$). Оценка по F -критерию Фишера показала, что полученное фактическое значение ($F_{\text{факт.}} = 1,03$ при $\sigma_1^2 = 80,3$, $\sigma_2^2 = 82,4$) ниже требуемого теоретического при $P = 0,01$ и $0,05$ ($F_{\text{табл.}, 0,01} = 1,60$, $F_{\text{табл.}, 0,05} = 1,39$).

Исходная выборка семян каштана по среднему весу в доверительном интервале генеральной совокупности ($\mu = 4,87 \pm 0,24$ г, при $p = 0,95$) находится в пределах границ дифференциации семян в каштаннике колхидском (4,51–5,25 г [24], 4,5–6,9 г [20]). Она характеризует участки с модельными деревьями как репрезентативные по биоценотическим и лесорастительным условиям для анализируемого субтропического района. Лабораторная всхожесть семян ($\bar{x} = 92,9 \pm 3,7$ %) как посадочного материала не превышает допустимую ($\pm 4 - 5$ % [50]). Кондиционность семян также подтверждается величинами фактического отклонения всхожести отдельных семян в трех аналитических пробах (повторностях) от среднего значения всей выборочной совокупности (разница недостоверна с ошибкой $S_d = 1,04 - 1,05$; $p = 0,228 - 0,819$). Следовательно, фактический материал позволяет проводить сравнительный анализ и делать статистически достоверные выводы.

Полученные результаты по развитию каштана из семян на начальном этапе развития (рис. 1) указывают на наличие двух протекающих в семенах процессов. По теоретическим данным, прорастающие растения, взаимодействуя с субстратом, выделяют в прилегающую среду аллелопатически активные соединения тормозителей роста [51], что обеспечивает освобождение жизненного

пространства [52] под их действием и формирует питательную среду для почвенных микроорганизмов в прилегающей зоне [53], создавая условия для бурного их развития [37]. Обратное поступление из субстрата в семена продуктов вторичного метаболизма растений и микрофлоры определяется набором витаминов, антибиотиков, растительных гормонов, кофакторов ферментов и других необходимых семенам биологически активных веществ [45, 52, 53]. После завершения периода полураспада, который длится от нескольких часов до нескольких суток [54, 55], они изменяют свое участие, которое выражается в общем преобразовании (усиление или замедление) ростовых процессов [56].

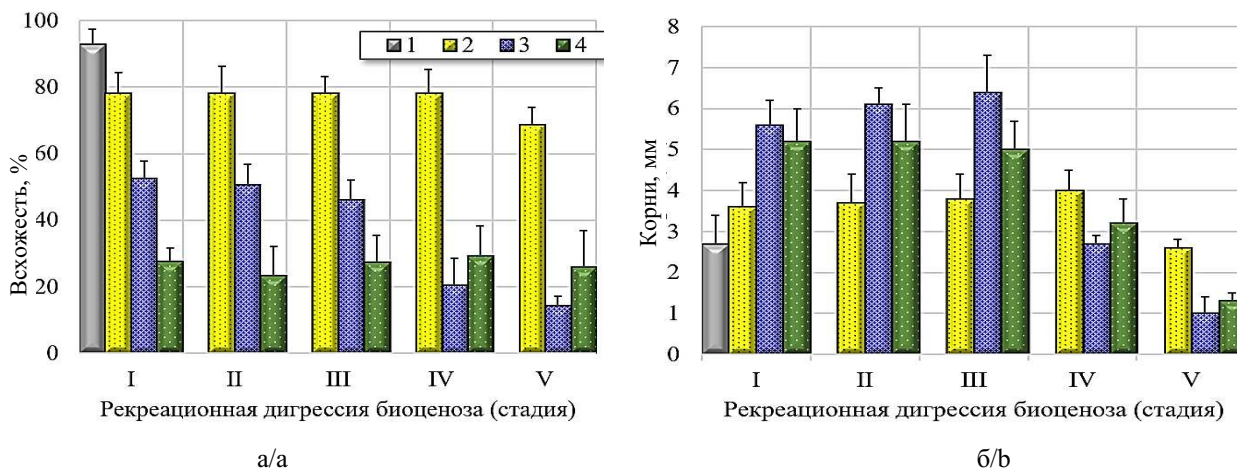


Рис. 1. Зависимость всхожести на инертном субстрате (а) и развития корней сеянцев каштана (б) при рекреационной трансформации биоценоза от аллелопатического потенциала тестируемых проб: 1 – контроль (условное отсутствие аллелопатического фона); 2 – филлосфера; 3 – некроподиум; 4 – ризосфера / Fig. 1. Dependence of germination on an inert substrate (a) and root development of chestnut seedlings (b) during recreational transformation of the biocenosis on the allelopathic potential of the tested samples: 1 – control (conditional absence of allelopathic background); 2 – phyllosphere; 3 – necropodium; 4 – rhizosphere

Всхожесть под влиянием филлосферы, характеризуясь комплексом активных прижизненных выделений из листьев и других надземных органов (гуттация, экскреция газообразных веществ, выделение твердых продуктов), поступающих с осадками [31, 47], в рекреационно нарушенных условиях является ожидаемо менее чувствительным показателем (рис. 1а), реагируя только на высокие нагрузки. Снижаясь в V стадии дигрессии на 12–16 %, всхожесть отражает сквозистость кронового пространства (температурно-влажностной режим), распределение и количество поступающих осадков [57], опосредованное изменение экологической среды [13, 16, 45, 58] в результате снижения аллелопатической напряженности в подкрановой зоне [11].

Некроподиум, находясь в тесной зависимости от запасов лесной подстилки [59], ингибирует развитие на 43,5–72,9 % ($\bar{x} = 58,2\%$). Значительное снижение всхожести в IV–V стадиях рекреационной дигрессии объясняется механическим измельчением остатков листового опада и подстилки, характерным для высоких нагрузок в рекреационных зонах [10, 16, 18], что увеличивает скорость поступления органических веществ в почву.

Аллелопатическое воздействие ризосферы с набором сапролинов и миазминов корневой системы наиболее сильно тормозит всхожесть семян, ингибируя их развитие на 66,3–81,3 % ($\bar{x} = 73,8\%$), что в целом согласуется с ранее полученными результатами по величине трансформации в других лесных экосистемах зоны влажных субтропиков [11, 13, 16, 59].

Из рис. 1б следует, что первичный рост корешков каштана на этапе проростков более чувствителен к большинству аллелохимических веществ, чем прорастание семян [60], что характеризует доминирующее влияние стимулирующих веществ всходов. С ростом рекреационной нагрузки аллелохимическая активность каштана снижается после III стадии дигрессии, подтверждая её критический уровень [10, 11, 15, 16, 18, 59]. Последующее увеличение рекреационного воздействия с формированием анаэробных условий в уплотненной почве сопровождается самоотравлением растений в результате превращения гетеротрофами корневых выделений в сильно восстановленные соединения (спирты, альдегиды, оксикислоты, углеводороды и т.д.) [61]. Нитратный азот переходит в молекулярный, недоступный для растений. Усиливается активизация аммонифицирующих и

денитрифицирующих бактерий. С переходом аэробной микрофлоры в споровое состояние снижается её активность и процесс минерализации органических веществ [62].

Отличие пятого варианта опыта от других ($S_d \geq 0,79$; $t \geq 31,3$; при $p > 0,95$) определяется суммарным эффектом комплекса групп химических соединений, взаимодействующих аддитивно, антагонистически или синергетически [63, 64], наличием летучих и водорастворимых соединений, выщелачиваемых осадками из живых листьев, корневых экссудатов и диффундирующих из лесной подстилки [26, 29–32, 34, 35, 45].

В очень чистой ($IP = 1,88–2,49$) и чистой ($IP = 1,62–3,32$) среде показатель всхожести (рис. 2а, б) проявляет низкую достоверность связи с рекреационным фактором (соответственно $r = -0,53$ ($R^2 = 0,295$) и $r = -0,57$ ($R^2 = 0,332$)).

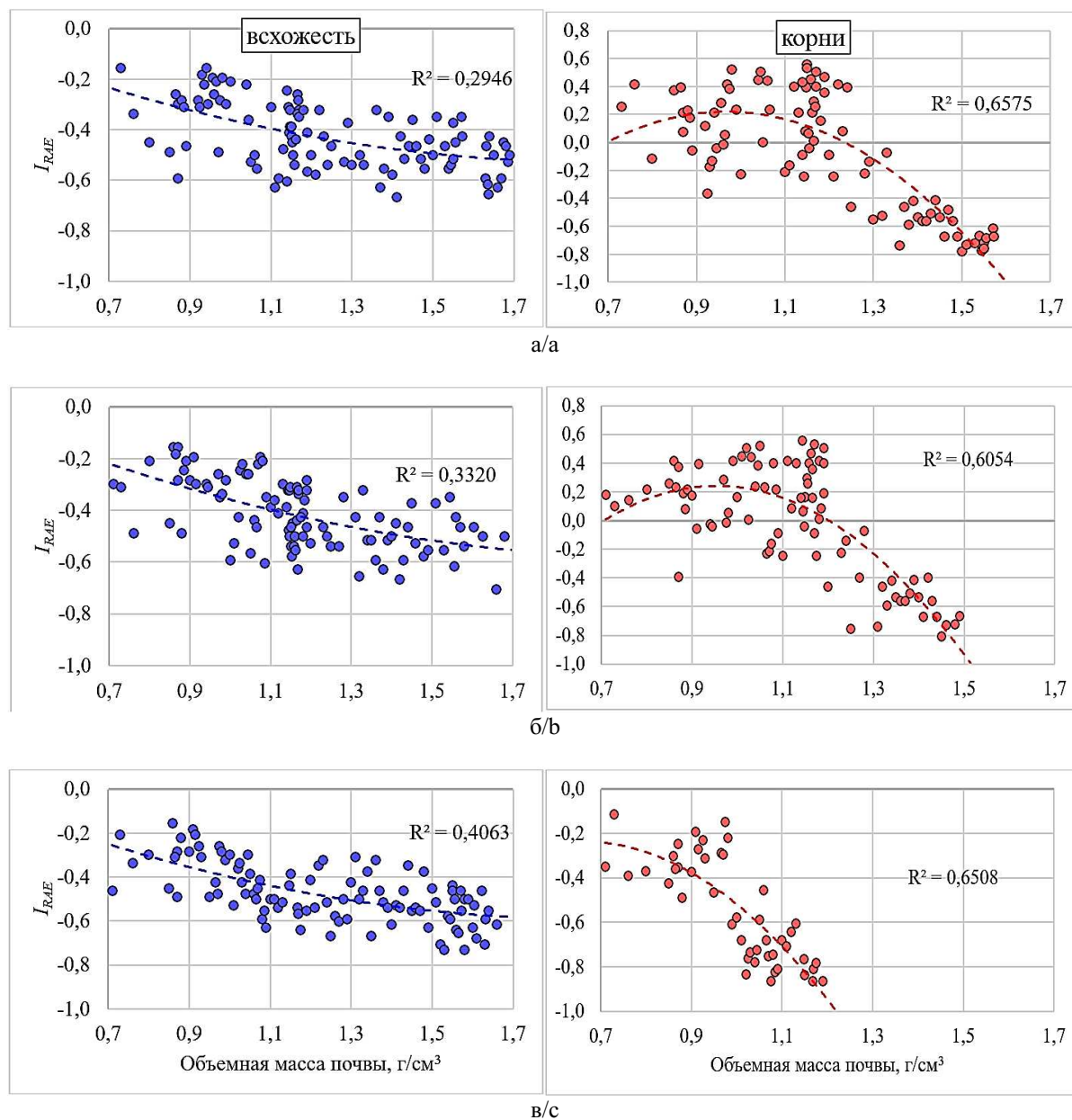


Рис. 2. Соотношение аллелопатических эффектов (I_{RAE}) на стадии прорастания семян и всходов с рекреационным уплотнением почвы. Состояние воздушной среды: а – очень чистая; б – чистая; в – относительно чистая. В поле графика приведены значения нескорректированного коэффициента детерминации (R^2) при вероятности $p = 0,95$ / Fig. 2. The ratio of allelopathic effects (I_{RAE}) at the stage of seed germination and seedlings with recreational soil compaction, under the state of the air: a – very clean; б – clean; в – relatively clean. The graph field shows the values of the uncorrected coefficient of determination (R^2) with a probability $p = 0,95$

Отличия достоверны только между диапазонами плотности почвы $< 0,98$ и $> 1,45$ г/см³. Поэтому возможна только констатация общей тенденции на тренде объемной массы почвы. Связь усиливается с возрастанием загрязнения среды (рис. 2в), достигая возможного максимума при относительно чистой среде по всхожести ($r = -0,63$; $R^2 = 0,406$) и сеянцам ($r = -0,79$; $R^2 = 0,651$). В целом регистрируемые явления, объясняемые величиной трансформации лесного биогеоценоза [3, 12, 16, 45, 59], указывают на ингибирующее влияние аллелопатического фактора на стадии прорастания семян и стимулирующий эффект в период последующего развития всходов. Наслоение техногенного фактора усиливает трансформацию среды и, соответственно, увеличивает косвенное воздействие на возобновительный процесс, особенно проявляющееся при максимально регистрируемом в данных опытах антропогенном прессе – относительно чистой среде ($IP = 3,68-4,70$) и плотности почвы $1,25-1,70$ г/см³.

Изменение лесной среды подтверждается динамикой сокращения колинов (1,3–18,7 %) в лесной почве трансформированных биотопов (табл. 2), усиливающейся по мере роста нарузки.

Таблица 2 / Table 2

Средние значения УКЕ, мг/л, поверхностного слоя почвы (0–10 см) при рекреационной нарушенности и загрязнении воздушной среды биоценоза (IP) / Average values of CCU, mg/l, of the surface layer of soil (0–10 cm) with recreational disturbance and air pollution of the biocenosis (IP)

IP	Стадия рекреационной дигрессии				
	I	II	III	IV	V
1,88–2,49	218,7	239,1	217,5	215,7	214,5
2,63–3,32	217,3	222,2	215,7	208,1	201,6
3,68–4,70	211,6	216,5	194,3	181,5	173,3

В комплексе снижение устойчивости (снижение УКЕ), увеличение загрязнения атмосферного воздуха в биоценозе до состояния чистой среды и плотности почвы $> 1,45$ г/см³ сопровождается гибелью всходов, составляя по средним пробам 11 %. Увеличение загрязнения атмосферы до относительно чистой отражается в элиминации 53 % всходов уже при плотности почвы $\leq 1,19$ г/см³. В первую очередь страдают всходы на участках наиболее трансформированной аллелопатической среды.

Заключение

Уровень аллелопатического фона в биоценозе, зависящий от негативного антропогенного воздействия на природную среду, и влияние аллелопатии на начальных стадиях развития каштана посевного в зоне влажных субтропиков тесно взаимосвязаны. В ненарушенных или слабонарушенных местообитаниях каштана, в подкрановой зоне маточного дерева под воздействием комплекса активных прижизненных выделений из листьев и других надземных органов, поступающих с осадками в верхние горизонты почвы, семена каштана на этапе прорастания испытывают ингибирующее влияние (19,3–21,3 %), на стадии сеянцев – стимулирующее (11,7–30,4 %). Суммарный эффект действия колинов с участием сапролинов и миазминов ризосферы и лесной подстилки приводит, соответственно, к ингибированию всхожести на 71,0–72,6 % и стимуляции роста корней сеянцев на 32,0–40,1 %.

Когда в лесном биоценозе индекс полеотолерантности увеличивается в диапазоне 1,88–4,70 (от очень чистой к чистой и относительно чистой среде), напряженность аллелопатического фона в сообществе последовательно снижается по мере наслоения прогрессирующего рекреационного уплотнения почвы, угнетающе воздействуя на всхожесть каштана. Рост корней сеянцев, стимулируемый в очень чистой и чистой среде в диапазоне объемной массы почвы $0,70-1,24$ г/см³, сменяется их угнетением в относительно чистой среде каштанового биоценоза.

Высокая чувствительность каштана к комплексному воздействию рекреационного уплотнения почвы и загрязнению среды, проявляемая уже при индексах полеотолерантности 2,63–3,32 (чистая среда), косвенно объясняет превалирование в предгорной зоне каштановых лесов сообществ с полидоминантным древостоем и низким участием каштана в составе древостоя. Отсутствие в лесоводственной и лесохозяйственной практике комплексного подхода при разработке

структурной схемы процесса возобновления с оценкой аллелопатической среды и лимитирующих антропогенных факторов может привести к снижению рекреационных функций и сокращению площади коренных каштановых лесов в субтропической зоне России.

Список источников

1. Степановских А.С. Прикладная экология. М.: ЮНИТИ, 2005. 752 с.
2. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы в задачах охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
3. Балина К.В. Влияние автотранспорта на содержание тяжелых металлов в почвах и растениях городов и поселков Амурской области // Вестн. Брянского гос. ун-та. 2011. № 4. С. 95–97.
4. Булыгин Н.Е. Фенологические наблюдения за древесными растениями. Л.: ЛТА, 1979. 96 с.
5. Aryal P.C., Aryal C., Bhusal K., Chapagain D., Dhamala M.K., Maharjan S.R., Chhetri P.K. Forest structure and anthropogenic disturbances regulate plant invasion in urban forests // Urban Ecosystems. 2022. Vol. 25. P. 367–377. Doi: 10.1007/s11252-021-01159-7.
6. Gaggini L., Rusterholz H.P., Baur B. The invasive plant *impatiens glandulifera* affects soil fungal diversity and the bacterial community in forests // Applied Soil Ecology. 2018. Vol. 124. P. 335–343. Doi: 10.1016/j.apsoil.2017.11.021.
7. Султанова Р.Р., Хайретдинов А.Ф., Мартынова М.В. Оптимизация рекреационного лесопользования. Уфа: Башкирский гос. аграр. ун-т, 2015. 255 с.
8. Gamfeldt L., Hillebrand H., Jonsson P.R. Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning // Ecology. 2008. Vol. 89, № 5. P. 1223–1231.
9. Ciccacese L., Mattsson A., Pettenella D. Ecosystem services from forest restoration: thinking ahead // New Forests. 2012. Vol. 43, № 5–6. P. 543–560.
10. Ивонин В.М. Рекреология. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 240 с.
11. Щербина В.Г. Динамика доли ослабленных деревьев в грабовых экосистемах при комплексном воздействии антропогенных факторов // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 4 (38). С. 162–169. Doi: 10.33075/2220-5861-2019-4-162-169.
12. Щербина В.Г. Динамика жизненного состояния древостоев дубовой формации в рекреационной зоне Сочинского региона // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 2 (36). С. 135–141. Doi: 10.33075/2220-5861-2019-2-135-141.
13. Щербина В.Г. Влияние рекреационного воздействия в лесных сообществах на аллелопатический режим древесных эдификаторов // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 102–110. Doi: 10.33075/2220-5861-2021-4-102-110.
14. Iksanov R., Khalikova O., Vladimirov I., Gizzatullin R., Baiturina R., Kovshov V., Selezneva A., Khasanova S. Forestry violations as a global issue of legal regulation in the field of forest control and supervision: The Krasnodar territory and the Republic of Bashkortostan case study // J. of Forest Science. 2021. Vol. 67, № 6. P. 272–284. Doi: 10.17221/99/2020-JFS.
15. Халикова О.В., Исяньюлова Р.Р. Оценка санитарного состояния особо ценных лесных массивов в Михайловском лесничестве Геленджикского лесхоза // Рос. электр. науч. журн. 2019. № 1 (31). С. 136–144. Doi: 10.31563/2308-9644-2019-31-1-136-144.
16. Щербина В.Г., Белоченко И.С. Влияние степени атмосферного загрязнения на динамику ослабленного древостоя при критических рекреационных нагрузках // Экол. вестн. Северного Кавказа. 2019. Т. 15, № 4. С. 29–36.
17. Гулисаивили В.З., Махатадзе Л.Б., Прилипко Л.И. Растительность Кавказа. АН СССР, АН ГССР, Тбилисский институт леса. М.: Наука, 1975. 233 с.
18. Ивонин В.М., Авдонин В.Е., Пеньковский Н.Д. Рекреационная экология горных лесов российского Причерноморья. Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 271 с.
19. Бугаев В.А., Лозовой А.Д. Леса из каштана съедобного на Северо-Западном Кавказе под угрозой исчезновения // Проблемы и пути рационального использования природных ресурсов и охрана природы. Вильнюс: Вильнюсский гос. ун-т им. В. Капсукаса, 1986. С. 22–24.
20. Соколов В.Б. Каштан. М.: Лесная промышленность, 1984. 80 с.
21. Коркешико А.А. Каштанники Краснодарского края // Охрана реликтовой растительности и животного мира Северо-Западного Кавказа. Л.: Изд-во ГО СССР, 1983. С. 30–39.
22. Иссинский П.А. Каштановые леса Кавказа и основы ведения хозяйства в них // Тр. СочНИЛЮС. М.: Лесная промышленность, 1968. Вып. 4. 240 с.
23. Куражковский Ю.Н. Экологические исследования в Кавказском биосферном заповеднике. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1985. 160 с.
24. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесная промышленность, 1980. 408 с.

25. Bais H.P., Park S.W., Weir T.L., Callaway R.M., Vivanco J.M. How plants communicate using the underground information superhighway // Trends Plant Sci. 2004. № 9. P. 26–32. Doi: 10.1016/j.tplants.2003.11.008.
26. Weir T.L., Park S.W., Vivanco J.M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals // Curr. Opin. Plant Biol. 2004. № 7. P. 472–479. Doi: 10.1016/j.pbi.2004.05.007.
27. Inderjit, Weiner J. Plant allelochemical interference or soil chemical ecology? // Perspect. Plant Ecol. 2001. № 4. P. 3–12. Doi: 10.1078/1433-8319-00011.
28. Buehler C., Rodgers J. Soil property differences between invaded casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.) sites and non-casuarinasites in the Bahamas // Phys. Geogr. 2012. № 33. P. 574–588. Doi: 10.2747/0272-3646.33.6.574.
29. Farooq M., Bajwa A.A., Cheema S.A., Cheema Z.A. Application of allelopathy in crop production // Int. J. Agric. Biol. 2013. № 15. P. 1367–1378.
30. Kroymann J. Natural diversity and adaptation in plant secondary metabolism // Curr. Opin. Plant Biol. 2011. № 14. P. 246–251. Doi: 10.1016/j.pbi.2011.03.021
31. Kegge W., Pierik R. Biogenic volatile organic compounds and plant competition // Trends Plant Sci. 2009. № 15. P. 126–132. Doi: 10.1016/j.tplants.2009.11.007.
32. Ninkovik V. Volatile communication between barley plants affects biomass allocation // J. Exp. Bot. 2003. № 54. P. 1931–1939. Doi: 10.1093/jxb/erg192.
33. Teasdale J.R., Rice C.P., Cai G.M., Mangum R.W. Expression of allelopathy in the soil environment: soil concentration and activity of benzoxazinoid compounds released by rye cover crop residue // Plant Ecol. 2012. № 213. P. 1893–1905. Doi: 10.1007/s11258-012-0057-x.
34. Kobayashi K. Factors affecting phytotoxic activity of allelochemicals in soil // Weed Biol. Manag. 2004. № 4. P. 1–7. Doi: 10.1111/j.1445-6664.2003.00112.x.
35. Li X.J., Xia Z.C., Kong C.H., Xu X.H. Mobility and microbial activity of allelochemicals in soil // J. Agric. Food Chem. 2013. № 61. P. 5072–5079. Doi: 10.1021/jf400949m.
36. Li Z., Wang Q., Ruan X., Pan C., Jiang D. Phenolics and plant allelopathy // Molecules. 2010. № 15. P. 8933–8952. Doi: 10.3390/molecules15128933.
37. Федотов Г.Н., Горепекин И.В., Позднякова А.Д., Завгородняя Ю.А., Исакова С.А. Взаимосвязь предыстории использования и химических свойств почв с их аллелотоксичностью // Почвоведение. 2020. № 3. С. 379–386. Doi: 10.31857/S0032180X2003003X.
38. Горчарук Л.Г., Горчарук Л.М., Дрелевская И.М. Характеристика почв основных реликтовых древесных пород Кавказского заповедника // Охрана реликтовой растительности и животного мира Северо-Западного Кавказа. Л.: Изд-во ГО СССР, 1983. С. 60–74.
39. Plants of the world online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org/Retrieved> (дата обращения: 19.02.2022).
40. Красногорская Н.Н., Журавлева С.Е., Минцуллина Г.Р. Лихеноиндикационные шкалы оценки качества атмосферного воздуха // Фундаментальные исследования. 2004. № 5. С. 38–42.
41. Пчелкин А.В., Боголюбов А.С. Методы лихеноиндикации загрязнений окружающей среды: метод. пособие. М.: Экосистема, 1997. 25 с.
42. Боголюбов А.С., Кравченко М.В. Оценка загрязнения воздуха методом лихеноиндикации: метод. пособие. М.: Экосистема, 2001. 15 с.
43. Казанская Н.С., Исаков Ю.А. Классификация, география и антропогенная трансформация экосистем. М.: Наука, 1980. 98 с.
44. Патент № А01В1А01G23. Инструмент для извлечения тонких корней деревьев, растений. С.В. Закамский, В.А. Закамский 23.03.2013.
45. Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications / ed. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Springer, 2006. 637 p.
46. Алексейчук Г.Н. Сила роста семян зерновых культур и ее оценка методом ускоренного старения. Минск: Право и экономика, 2009. 44 с.
47. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1991. 532 с.
48. Yang M., Zhao Y., Qin Y., Xu R., Yang Z., Peng H. Untargeted Metabolomics and Targeted Quantitative Analysis of Temporal and Spatial Variations in Specialized Metabolites Accumulation in *Poria cocos* (Schw.) Wolf (Fushen) // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. P. 713490. Doi: 10.3389/fpls.2021.713490.
49. Рокицкий П.Ф. Биологическая статистика. Минск: Высшая школа, 1964. 328 с.
50. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести (с изменениями № 1, 2). М.: Стандарт, 2004. 30 с.
51. Сечняк Л.К., Киндрук Н.А., Слюсаренко О.К., Иващенко В.Г., Кузнецов Е.Д. Экология семян пшеницы. М.: Колос, 1983. 349 с.
52. Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головки Э.Я. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
53. Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 464 с.

54. Gimsing A.L., Baelum J., Dayan F.E., Locke M.A., Sejero L.H., Jacobsen C.S. Mineralization of the allelochemical sorgoleone in soil // *Chemosphere*. 2009. № 76. P. 1041–1047. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.04.048.
55. Kong C.H., Zhao H., Xu X.H. Activity and allelopathy of soil of flavone O-glycosides from rice // *J. Agric. Food Chem*. 2007. № 55. P. 6007–6012. Doi: 10.1021/jf0703912.
56. Jabran K., Mahajan G., Sardana V., Chauhan B.S. Allelopathy for weed control in agricultural systems // *Crop Prot*. 2015. № 72. P. 57–65. Doi: 10.1016/j.cropro.2015.03.004.
57. Снакин В.В., Андреева А.Е., Присяжная А.А. Трансформация состава атмосферных осадков пологом Колхидского леса // Почвенно-биогеоценологические исследования на Северо-Западном Кавказе. Пушкино, 1990. С. 70–82.
58. Иванов В.П. Растительные выделения и их значение в жизни фитоценозов. М.: Наука, 1973. 294 с.
59. Щербина В.Г. Аллелопатический режим почвы после разовой рекреационной нагрузки в лесных экосистемах Сочинского Причерноморья // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 1. С. 96–106. Doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-96-106.
60. Kato T., Saito N., Kashimura K., Shinohara M., Kurahashi T., Taniguchi K. Germination and growth inhibitors from wheat (*Triticum aestivum*) husks // *J. of Agricultural and Food Chemistry* 2002. № 50. P. 6307–6312. Doi: 10.1021/jf0204755.
61. Гринева Г.М. О выделении веществ корнями растений при кратковременном анаэробии // Физиология растений. 1961. Т. 8, № 6. С. 123–131.
62. Иванова Н.А. Влияние переувлажнения на микрофлору подзолисто-глеевых почв и использование ячменем азота и фосфора: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1972. 26 с.
63. Wu H., Pratley J., Lemerle D., Haig T. Screening methods for the evaluation of crop allelopathy // *The Botanical Review*. 2001. № 67. P. 403–415.
64. Lorito M., Peterbauer C., Hayes C.K., Harman G.F. Synergic Interaction between Fungal Cell Wall Degrading Enzymes and Different Antifungal Compounds Enhances Inhibition of Spore Germination // *Microbiology*. 1994. № 140. P. 623–629.

References

1. Stepanovskikh A.S. *Applied ecology*. Moscow: UNITI Publ.; 2005. 752 p. (In Russ.).
2. Penenko V.V., Aloyan A.E. *Models and methods in problems of environmental protection*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1985. 256 p. (In Russ.).
3. Balina K.V. Influence of motor transport on the content of heavy metals in soils and plants of cities and towns of the Amur Region. *Vestn. Bryanskogo gos. un-ta = The Bryansk State University Herald*. 2011;(4):95-97. (In Russ.).
4. Bulygin N.E. *Phenological observations of woody plants*. Leningrad: Forestry Academy Press; 1979. 96 p. (In Russ.).
5. Aryal P.C., Aryal C., Bhusal K., Chapagain D., Dhamala M.K., Maharjan S.R., Chhetri P.K. Forest structure and anthropogenic disturbances regulate plant invasion in urban forests. *Urban Ecosystems*. 2022;25:367-377, doi: 10.1007/s11252-021-01159-7.
6. Gaggini L., Rusterholz H.P., Baur B. The invasive plant *impatiens glandulifera* affects soil fungal diversity and the bacterial community in forests. *Applied Soil Ecology*. 2018;124:335-343, doi: 10.1016/j.apsoil.2017.11.021.
7. Sultanova R.R., Khairtdinov A.F., Martynova M.V. *Optimization of recreational forest management*. Ufa: Bashkir State Agrarian University Press; 2015. 255 p. (In Russ.).
8. Gamfeldt L., Hillebrand H., Jonsson P.R. Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning. *Ecology*. 2008;89(5):1223-1231.
9. Ciccacese L., Mattsson A., Pettenella D. Ecosystem services from forest restoration: thinking ahead. *New Forests*. 2012;43(5-6):543-560.
10. Ivonin V.M. *Recreology*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 240 p. (In Russ.).
11. Shcherbina V.G. Dynamics of the share of weakened trees in hornbeam ecosystems under the complex impact of anthropogenic factors. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy = Monitoring Systems of Environment*. 2019;(4):162-169, doi: 10.33075/2220-5861-2019-4-162-169. (In Russ.).
12. Shcherbina V.G. Dynamics of the vital state of oak formation forest stands in the recreational zone of the Sochi region. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy = Monitoring Systems of Environment*. 2019;(2):135-141, doi: 10.33075/2220-5861-2019-2-135-141. (In Russ.).
13. Shcherbina V.G. Influence of recreational impact in forest communities on the allelopathic regime of woody edificators. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy = Monitoring Systems of Environment*. 2021;(4):102-110, doi: 10.33075/2220-5861-2021-4-102-110. (In Russ.).
14. Iksanov R., Khalikova O., Vladimirov I., Gizzatullin R., Baiturina R., Kovshov V., Selezneva A., Khasanova S. Forestry violations as a global issue of legal regulation in the field of forest control and supervision:

The Krasnodar territory and the Republic of Bashkortostan case study. *Journal of Forest Science*. 2021;67(6):272-284, doi: 10.17221/99/2020-JFS.

15. Khalikova O.V., Isyanyulova R.R. Assessment of the sanitary condition of especially valuable forest areas in the Mikhailovsky forestry of the Gelendzhik forestry. *Ros. elektr. nauch. zhurn. = Russian Electronic Scientific Journal*. 2019;(1):136-144, doi: 10.31563/2308-9644-2019-31-1-136-144. (In Russ.).

16. Shcherbina V.G., Belyuchenko I.S. Influence of the degree of atmospheric pollution on the dynamics of a weakened forest stand under critical recreational loads. *Ekol. vestn. Severnogo Kavkaza = The North Caucasus Ecological Herald*. 2019;15(4):29-36. (In Russ.).

17. Gulisashvili V.Z., Makhatadze L.B., Prilipko L.I. *Vegetation of the Caucasus*. Academy of Sciences of the USSR, Academy of Sciences of the GSSR, Tbilisi Institute of Forestry. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 233 p. (In Russ.).

18. Ivonin V.M., Avdonin V.E., Penkovsky N.D. *Recreational ecology of mountain forests of the Russian Black Sea region*. Rostov-on-Don: North Caucasus Higher School Research Center Press; 2000. 271 p. (In Russ.).

19. Bugaev V.A., Lozovoi A.D. Edible chestnut forests in the Northwestern Caucasus are under the threat of extinction. *Problems and ways of rational use of natural resources and nature conservation*. Vilnius: Kapsukas Vilnius State University Press; 1986:22-24. (In Russ.).

20. Sokolov V.B. *Chestnut*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1984. 80 p. (In Russ.).

21. Korkeshko A.A. Chestnut forests of the Krasnodar Territory. *Protection of relict vegetation and wildlife of the North-Western Caucasus*. Leningrad: Civil Defense of the USSR Press; 1983:30-39. (In Russ.).

22. Issinsky P.A. Chestnut forests of the Caucasus and the basics of managing them. *Tr. SochNILOS*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1968;(4). 240 p. (In Russ.).

23. Kurazhkovsky Yu.N. *Ecological research in the Caucasian Biosphere Reserve*. Rostov-on-Don: Rostov University Press; 1985. 160 p. (In Russ.).

24. Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1980. 408 p. (In Russ.).

25. Bais H.P., Park S.W., Weir T.L., Callaway R.M., Vivanco J.M. How plants communicate using the underground information superhighway. *Trends Plant Sci*. 2004;(9):26-32, doi: 10.1016/j.tplants.2003.11.008.

26. Weir T.L., Park S.W., Vivanco J.M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals. *Curr. Opin. Plant Biol*. 2004;(7):472-479, doi: 10.1016/j.pbi.2004.05.007.

27. Inderjit, Weiner J. Plant allelochemical interference or soil chemical ecology? *Perspect. Plant Ecol*. 2001;(4):3-12, doi: 10.1078/1433-8319-00011.

28. Buehler C., Rodgers J. Soil property differences between invaded casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.) sites and non-casuarinasites in the Bahamas. *Phys. Geogr*. 2012;(33):574-588, doi: 10.2747/0272-3646.33.6.574

29. Farooq M., Bajwa A.A., Cheema S.A., Cheema Z.A. Application of allelopathy in crop production. *Int J. Agric Biol*. 2013;(15):1367-1378.

30. Kroymann J. Natural diversity and adaptation in plant secondary metabolism. *Curr. Opin. Plant Biol*. 2011;(14):246-251, doi: 10.1016/j.pbi.2011.03.021.

31. Kegge W., Pierik R. Biogenic volatile organic compounds and plant competition. *Trends Plant Sci*. 2009;(15):126-132, doi: 10.1016/j.tplants.2009.11.007.

32. Ninkovik V. Volatile communication between barley plants affects biomass allocation. *J. Exp. Bot*. 2003;(54):1931-1939, doi: 10.1093/jxb/erg192.

33. Teasdale J.R., Rice C.P., Cai G.M., Mangum R.W. Expression of allelopathy in the soil environment: soil concentration and activity of benzoxazinoid compounds released by rye cover crop residue. *Plant Ecol*. 2012;(213):1893-1905, doi: 10.1007/s11258-012-0057-x.

34. Kobayashi K. Factors affecting phytotoxic activity of allelochemicals in soil. *Weed Biol. Manag*. 2004;(4):1-7, doi: 10.1111/j.1445-6664.2003.00112.x.

35. Li X.J., Xia Z.C., Kong C.H., Xu X.H. Mobility and microbial activity of allelochemicals in soil. *J. Agric. Food Chem*. 2013;(61):5072-5079, doi: 10.1021/jf400949m.

36. Li Z., Wang Q., Ruan X., Pan C., Jiang D. Phenolics and plant allelopathy. *Molecules*. 2010;(15):8933-8952, doi: 10.3390/molecules15128933.

37. Fedotov G.N., Gorepekin I.V., Pozdnyakova A.D., Zavgorodnyaya Yu.A., Isakova S.A. The relationship between the prehistory of use and the chemical properties of soils with their allelotoxicity. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2020;(3):379-386, doi: 10.31857/S0032180X2003003X. (In Russ.).

38. Gorcharuk L.G., Gorcharuk L.M., Drelevskaya I.M. Soil characteristics of the main relict tree species of the Caucasian Reserve. *Protection of relict vegetation and wildlife of the North-Western Caucasus*. Leningrad: Civil Defense of the USSR Press; 1983:60-74. (In Russ.).

39. *Plants of the world online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew*. Available from: <http://www.plantsoftheworldonline.org/Retrieved> [Accessed 19th February 2022].

40. Krasnogorskaya N.N., Zhuravleva S.E., Minnullina G.R. Lichenoindication scales for assessing the quality of atmospheric air. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2004;(5):38-42. (In Russ.).

41. Pchelkin A.V., Bogolyubov A.S. *Methods of lichen indication of environmental pollution: methodical manual*. Moscow: Ekosistema Publ.; 1997. 25 p. (In Russ.).

42. Bogolyubov A.S., Kravchenko M.V. *Evaluation of air pollution by the method of lichen indication: methodical manual*. Moscow: Ekosistema Publ.; 2001. 15 p. (In Russ.).
43. Kazanskaya N.S., Isakov Yu.A. *Classification, geography and anthropogenic transformation of ecosystems*. Moscow: Nauka Publ.; 1980. 98 p. (In Russ.).
44. Zakamsky S.V., Zakamsky V.A. *Tool for extracting thin roots of trees, plants*. Certificate No. A01B1A01G23. 23rd March 2013. (In Russ.).
45. Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L., eds. *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Springer, 2006. 637 p.
46. Alekseychuk G.N. *The strength of the growth of seeds of grain crops and its evaluation by the method of accelerated aging*. Minsk: Pravo i ekonomika Publ.; 2009. 44 p. (In Russ.).
47. Grodzinsky A.M. *Plant allelopathy and soil fatigue*. Kyiv: Naukova dumka Publ.; 1991. 532 p. (In Russ.).
48. Yang M., Zhao Y., Qin Y., Xu R., Yang Z., Peng H. Untargeted Metabolomics and Targeted Quantitative Analysis of Temporal and Spatial Variations in Specialized Metabolites Accumulation in *Poria cocos* (Schw.) Wolf (Fushen). *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:713490, doi: 10.3389/fpls.2021.713490.
49. Rokitsky P.F. *Biological statistics*. Minsk: Vysshaya shkola Publ.; 1964. 328 p. (In Russ.).
50. GOST 12038-84. *Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination (with Changes No. 1, 2)*. Moscow: Standard Publ.; 2004. 30 p. (In Russ.).
51. Sechnyak L.K., Kindruk N.A., Slyusarenko O.K., Ivashchenko V.G., Kuznetsov E.D. *Ecology of wheat seeds*. Moscow: Kolos Publ.; 1983. 349 p. (In Russ.).
52. Grodzinsky A.M., Bogdan G.P., Golovko E.Ya. *Allelopathic soil fatigue*. Kyiv: Naukova dumka Publ.; 1979. 248 p. (In Russ.).
53. Krasilnikov N.A. *Soil microorganisms and higher plants*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Press; 1958. 464 p. (In Russ.).
54. Gimsing A.L., Baelum J., Dayan F.E., Locke M.A., Sejero L.H., Jacobsen C.S. Mineralization of the allelochemical sorgoleone in soil. *Chemosphere*. 2009;(76):1041-1047, doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.04.048.
55. Kong C.H., Zhao H., Xu X.H. Activity and allelopathy of soil of flavone O-glycosides from rice. *J. Agric. Food Chem*. 2007;(55):6007-6012, doi: 10.1021/jf0703912.
56. Jabran K., Mahajan G., Sardana V., Chauhan B.S. Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Prot*. 2015;(72):57-65, doi: 10.1016/j.cropro.2015.03.004.
57. Snakin V.V., Andreeva A.E., Prisyazhnaya A.A. Transformation of the composition of atmospheric precipitation by the canopy of the Colchis forest. *Soil-biogeocenological research in the North-Western Caucasus*. Pushchino, 1990:70-82. (In Russ.).
58. Ivanov V.P. *Plant secretions and their significance in the life of phytocenoses*. Moscow: Nauka Publ.; 1973, 294 p. (In Russ.).
59. Shcherbina V.G. Allelopathic regime of the soil after a one-time recreational load in forest ecosystems of the Sochi Black Sea region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(1):96-106, doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-96-106. (In Russ.).
60. Kato T., Saito N., Kashimura K., Shinohara M., Kurahashi T., Taniguchi K. Germination and growth inhibitors from wheat (*Triticum aestivum*) husks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002;(50):6307-6312, doi: 10.1021/jf0204755.
61. Grineva G.M. On the release of substances by plant roots during short-term anaerobiosis. *Plant Physiology*. 1961;8(6):123-131. (In Russ.).
62. Ivanova N.A. *Influence of waterlogging on the microflora of podzolic-gley soils and the use of nitrogen and phosphorus by barley*. Dissertation Thesis. Leningrad, 1972. 26 p. (In Russ.).
63. Wu H., Pratley J., Lemerle D., Haig T. Screening methods for the evaluation of crop allelopathy. *The Botanical Review*. 2001;(67):403-415.
64. Lorito M., Peterbauer C., Hayes C.K., Harman G.F. Synergic Interaction between Fungal Cell Wall Degrading Enzymes and Different Antifungal Compounds Enhances Inhibition of Spore Germination. *Microbiology*. 1994;(140):623-629.

Информация об авторе

В.Г. Щербина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

V.G. Scherbina - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 14.11.2022; принята к публикации 19.05.2023.
The article was submitted 18.10.2022; approved after reviewing 14.11.2022; accepted for publication 19.05.2023.

ПАМЯТИ УЧЕНОГО IN MEMORY OF SCIENTIST

Персоналии

doi 10.18522/1026-2237-2023-2-151-152

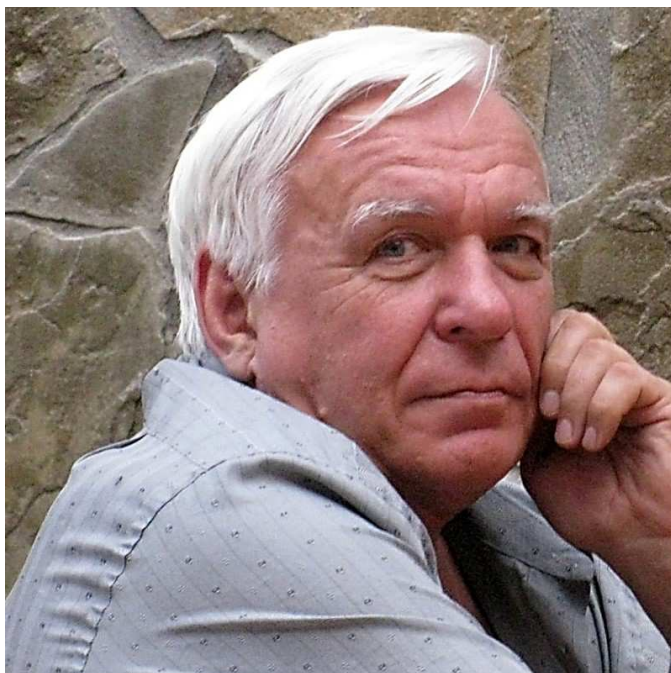
СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ КЛИМЕНТОВ (1951–2023)

Personalities

SERGEI BORISOVICH KLIMENTOV (1951–2023)

10 февраля 2023 г. ушел из жизни известный российский математик, доктор физико-математических наук, профессор Сергей Борисович Климентов.

С.Б. Климентов в 1968 г. с серебряной медалью окончил школу № 5, в то время – ведущую школу г. Ростова-на-Дону с физико-математическим уклоном, и поступил на механико-математический факультет Ростовского государственного университета, с которым в последующем будет связана вся его профессиональная жизнь. Он завершил свое обучение в 1973 г. и сразу был принят на должность ассистента кафедры математического анализа. Одновременно он поступил в заочную аспирантуру по кафедре геометрии к известному геометру проф. В.Т. Фоменко. Несмотря на объемную учебную нагрузку, С.Б. Климентов завершил работу над кандидатской диссертацией «Изгибания поверхностей рода $p \geq 0$ в римановом пространстве положительной внешней кривизны» досрочно и в 1977 г. успешно защитил ее в Одесском государственном университете.



Вскоре он перешел на кафедру геометрии, направление деятельности которой полностью соответствовало сфере его научных и педагогических интересов. За короткий период Сергей Борисович стал доцентом этой кафедры, а затем был переведен на должность старшего научного сотрудника для подготовки докторской диссертации. В 1987 г. он блестяще защищает докторскую диссертацию «Изгибания локально-выпуклых поверхностей положительной кривизны» в одном из ведущих научных центров – Институте математики СО АН СССР и в 1988 г. возглавляет кафедру геометрии РГУ. Заведовать ею он будет в течение тридцати лет, вплоть до объединения в 2018 г. кафедр математического анализа и геометрии.

С.Б. Климентов был редким для нашего времени универсальным математиком. В сфере его основных научных интересов – теория изгибания поверхностей и изометрических погружений, теория уравнений в частных производных, стохастические методы в геометрии и теории краевых задач в классах обобщенных аналитических функций. Во всех этих областях он добился впечатляющих результатов, получивших заслуженное признание математического сообщества. Им опубликовано около 200 научных и научно-ме-

тодических работ, включая несколько монографий и более 100 статей в ведущих математических журналах России и мира. Значителен его вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов в области математики. Под его научным руководством были выполнены и успешно защищены четыре кандидатские и одна докторская диссертация. Он был руководителем нескольких грантов Российского фонда фундаментальных исследований и целевых федеральных программ, членом нескольких диссертационных советов в Харькове, Ставрополе и Ростове-на-Дону, включая единственный в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах диссертационный совет ЮФУ по специальностям 01.01.01 и 01.01.02, в котором он долгие годы работал заместителем председателя.

Разнообразие и глубина научной деятельности С.Б. Климентова нашли свое отражение и плодотворное применение в его преподавательской работе. Он был лектором по широчайшему спектру классических университетских курсов (аналитическая геометрия, дифференциальная геометрия, математический анализ, теория функций комплексной переменной, топология, теория вероятностей и математическая статистика, теория случайных процессов, геометрия многообразий), разработал и читал уникальные авторские специальные курсы (минимальные поверхности, теория изгибаний, уравнения с частными производными, изгибания многогранников, обобщённые аналитические функции, дополнительные главы теории поверхностей, основания геометрии, риманова геометрия). Как лектора его всегда отличало умение не только определить содержание курса лекций и выстроить логическую последовательность его изложения, но и преподнести сложный математически и технически громоздкий материал на доступном для студентов уровне, не погрешив при этом строгостью изложения.

Существенный вклад Сергей Борисович внес в дело интеграции университетской и академической науки. В начале 2000-х гг. он принял активное участие в установлении сотрудничества между математиками Южного федерального университета и Южного математического института Владикавказского научного центра РАН, ведущим научным сотрудником которого он был в течение последних двух десятилетий. А широта его научных интересов и высокая требовательность к математическому уровню публикаций в немалой степени способствовали признанию и повышению авторитета журналов «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» и *Global and Stochastic Analysis*, членом редколлегий которых он являлся.

Не менее значительной была научно-организаторская деятельность С.Б. Климентова. Долгое время он активно работал в правлении Ростовского математического общества, а в 1990 г. выступил основным инициатором и организатором Всесоюзной конференции по геометрии в спортивно-оздоровительном лагере РГУ «Лиманчик», которая ранее традиционно проводилась раз в четыре года в ведущих научных центрах СССР. Уровень организации и научная насыщенность этой конференции произвели настолько мощное впечатление на участников, съехавшихся со всей страны, что руководство мехматов Московского, Ленинградского и Новосибирского университетов выступило с инициативой продолжить практику проведения подобных конференций на базе Ростовского университета, расширив существенно их тематику. Так возникла Международная школа-семинар по геометрии и анализу памяти Н.В. Ефимова, подготовкой и проведением которой долгие 16 лет (1992–2008 гг.) руководил С.Б. Климентов.

Сергей Борисович был не только блестящим профессионалом, но и неординарным человеком. Он любил и глубоко понимал жизнь во всех ее проявлениях, умел разделить с коллегами и друзьями радость успехов и поддержать их в трудную минуту. Он сам никогда не терял мужества и своим примером вселял уверенность во всех, кто его окружал, обладал многогранным чувством юмора, практически всегда был душой компании.

Сергей Борисович Климентов навсегда останется в памяти и сердцах своих коллег, учеников и всех тех, кому посчастливилось знать его, как крупный ученый и организатор науки, блестящий лектор, посвятивший себя любимой науке – математике, как открытый доброжелательный человек, искренне и щедро делившийся всеми своими талантами и отношением к жизни.

А.В. Абанин, А.О. Ватulyян, В.В. Казак, М.И. Карякин, Ю.С. Налбандян, С.М. Ситник

Персоналии

doi 10.18522/1026-2237-2023-2-153-154

ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ УСТИНОВ (1934–2023)

Personalities

YURI ANATOLYEVICH USTINOV (1934-2023)

4 января 2023 г. ушел из жизни известный российский ученый-механик, заслуженный деятель науки РФ, член Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории упругости Южного федерального университета Юрий Анатольевич Устинов.

Большая часть его жизни тесно связана с Ростовским государственным, а затем и с Южным федеральным университетом. В 1952 г. Юрий Анатольевич поступил на отделение механики физико-математического факультета Ростовского госуниверситета, которое окончил в 1957 г. По окончании университета работал ассистентом кафедры теоретической механики. Его первая работа, опубликованная в 1959 г. в журнале «ПММ» в соавторстве с научным руководителем профессором И.И. Воровичем, была посвящена решению контактной задачи о взаимодействии жесткого штампа с упругим слоем на основе асимптотического подхода и дала начало широкому кругу научных исследований в этой области.

В 1961 г. на факультете была создана кафедра теории упругости; Юрий Анатольевич стал одним из первых ее аспирантов и во время обучения разработал новый оригинальный асимптотический метод, позволивший изучить особенности напряженно-деформированного состояния в многосвязных телах со сближенными границами. Это исследование стало основой его кандидатской диссертации «Некоторые задачи теории упругости для двухсвязных областей с круговыми границами и их приложение», защищенной в 1964 г.

После защиты диссертации Юрий Анатольевич успешно сочетал преподавательскую деятельность на кафедре в должности доцента с выполнением хозяйственных договоров. Он внес существенный вклад в разработку методов расчета конструкций при горячей посадке бандажей на зубчатые колеса прокатных станков и шахтных подъемников, выполненных по заказу Новокраматорского машиностроительного завода, а по результатам этих исследований в соавторстве с И.И. Воровичем и Ю.В. Сафроновым была опубликована его первая монография «Расчет колес сложной конструкции» (М., 1967).

Важное место среди научных интересов Юрия Анатольевича занимала проблема предельного перехода от трехмерных задач теории упругости к двумерным. На основе глубокого анализа спектральных задач теории упругости им была построена строгая математическая теория толстых поперечно-неоднородных плит, позволившая решить ряд важных прикладных задач. Для слоистых плит с чередующимися жесткими и мягкими слоями было впервые установлено явление расслоения спектра в спектральных задачах, описывающих погранслойные решения, удалось разделить сильный и слабый погранслои. В результате этого было установлено нарушение принципа Сен-Венана для сильнонеоднородных пластин в его классической формулировке, были развиты новые асимптотические методы и методы расчета трехмерных задач. На основе построенной математической теории были проанализированы области применимости различных прикладных теорий и построены новые уточненные теории. Эти исследования в области деформирования поперечно-неоднородных плит составили основу его



докторской диссертации «Граничные задачи и проблема предельного перехода от трехмерных задач к двумерным для неоднородных плит», которая была защищена 1977 г. в Институте проблем механики АН СССР. В 2006 г. результаты этих исследований были опубликованы в монографии «Математическая теория поперечно-неоднородных плит».

После защиты докторской диссертации Юрий Анатольевич последовательно поднимался по административной лестнице – декан мехмата, секретарь парткома РГУ, ректор РИСХМа (ныне Донской государственный технический университет) (1983–1987).

Вместе с тем научные исследования занимали главное место в его жизни. После возвращения в РГУ Ю.А. Устинов читает лекции, готовит новые поколения студентов-механиков, активно занимается задачами, находящимися на стыке механики твердого деформируемого тела и физики сегнетоэлектриков, теорией волноводов. Он одним из первых на основе трехмерных моделей начал разрабатывать математическую теорию и методы расчета краевых задач для плит в линейной электроупругости. Для твердых волноводов он дал полное математическое описание структуры решений в окрестности критических частот; часть результатов опубликована в монографии «Математическая теория нерегулярных твердых волноводов» (1993 г., совместно с И.П. Гетманом). В 90-е г. исследования Юрия Анатольевича связаны с классическими задачами Сен-Венана для таких конструктивных элементов, как естественно закрученный стержень, цилиндрическая пружина, круговое кольцо, цилиндр с винтовой анизотропией. Для этих классов задач он разработал метод сведения трехмерных задач к двумерным, дал их вариационную постановку. Эти работы нашли свое отражение в монографии «Задачи Сен-Венана для псевдоцилиндров» (2003 г.).

Широта научных интересов и богатейший опыт в решении различных практических задач позволили Ю.А. Устинову применить свои знания для исследования некоторых задач гемодинамики, он построил математическую модель винтового пульсового движения крови в крупных артериальных сосудах.

У Юрия Анатольевича много учеников, он подготовил 14 кандидатов и 4 доктора физико-математических наук. Среди его учеников – академик НАН Азербайджана М.Ф. Мехтиев, заведующий научным отделом фирмы Endress+Nauze (Германия) доктор физ.-мат. наук И.П. Гетман. Многие годы он участвовал в работе редколлегии журналов «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» и «Известия НАН Азербайджана». Он первым из сотрудников механико-математического факультета РГУ был удостоен звания соросовского профессора. На протяжении многих лет Ю.А. Устинов принимал активное участие в аттестации кадров высшей квалификации. С 2002 г. он являлся председателем диссертационного совета Д 212.208.06 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук при Ростовском госуниверситете (с 2006 г. – Южном федеральном университете). Профессор Ю.А. Устинов был одним из авторитетных преподавателей мехмата. За время его педагогической деятельности он разработал ряд основных и оригинальных спецкурсов: «Теоретическая механика», «Теория оболочек», «Теория толстых плит», «Плоские и пространственные задачи теории упругости», «Электроупругость», «Приложения функционального анализа в задачах МСС».

Большие заслуги Юрия Анатольевича в деле подготовки научных кадров были отмечены орденами «Знак Почета» и Дружбы.

Коллеги и ученики помнят его как настоящего ученого, внесшего значительный вклад в развитие механики и образования в нашей стране, принципиального и отзывчивого человека. Он любил рассказывать о научных контактах с выдающимися учеными-механиками нашей страны, с большим чувством юмора – о спортивных достижениях и неудачах (ходил в туристические походы, играл в теннис, футбол, хорошо танцевал и продолжал этим заниматься в весьма преклонном возрасте).

Юрий Анатольевич оставил неизгладимый след в наших сердцах, память о нем надолго сохранится в них.

А.В. Абанин, А.О. Ватульян, М.И. Карякин, С.М. Ситник

Персоналии

doi 10.18522/1026-2237-2023-2-155-156

ВАСИЛИЙ ДАНИЛОВИЧ ПАНОВ (1936–2023)

Personalities

VASILY DANILOVICH PANOV (1936-2023)

17 марта 2023 г. в возрасте 87 лет после тяжёлой болезни ушёл из жизни Василий Данилович Панов, ветеран Гидрометслужбы, известный советский и российский учёный-гляциолог, заслуженный метеоролог Российской Федерации, кавалер ордена Дружбы, почётный работник Гидрометеослужбы России, почётный работник охраны природы России, доктор географических наук.

В.Д. Панов родился 26 февраля 1936 г. в станице Темижбекской Краснодарского края. В 1954 г. он окончил Ростовское речное училище и в течение 6 лет работал на судах Донского речного пароходства.

Изучением ледников Кавказа он начал заниматься будучи студентом Ростовского государственного университета в летних экспедициях под руководством известного гляциолога Х.Я. Закиева. В 1962 г. после окончания РГУ (кафедра физической географии) работал в Киргизском управлении гидрометеослужбы начальником снеголавинной станции Алабель на Тянь-Шане.

В 1963 г. В.Д. Панов перешел в г. Ростов-на-Дону, где началась его почти полувековая деятельность в Северо-Кавказском УГМС – вначале старшим инженером гидрографической партии, а затем в течение

28 лет начальником созданной им гляциологической партии, главным инженером Ростовской гидрометобсерватории. С 1991 г. он советник начальника Северо-Кавказского УГМС, а с 2001 г. – заместитель начальника отдела высокогорных гидрометеорологических исследований, ведущий гляциолог Северо-Кавказского гидрометцентра.

В 1963 г. В.Д. Панов организовал систематические гляциологические и гидрометеорологические наблюдения в горах Северного Кавказа. Под его руководством и при непосредственном участии в 1963–1970 гг. составлен «Каталог ледников Северного Кавказа».

В 1965–1975 гг. он организовал и возглавил обширные экспедиционные исследования по программе Международного гидрологического десятилетия. Полученные материалы были изданы в двух выпусках «Материалов наблюдений на горно-ледниковых бассейнах» (1980, 1987 гг.) и обобщены в коллективной монографии «Ледник Маруха».

В 1985–1990 гг. В.Д. Панов принял участие в коллективной работе (совместно с В.Д. Бакаловым, Д.С. Громаном и М.Ч. Залихановым) по управлению режимом горных ледников и стоком рек. В 1990 г. была издана соответствующая коллективная монография.

Итогом более чем тридцатилетних исследований ледников стала изданная В.Д. Пановым в 1993 г. в Гидрометеоиздате монография «Эволюция современного оледенения Кавказа».



С 1969 г. в течение 10 лет он преподавал гляциологию на геолого-географическом факультете Ростовского государственного университета.

В 1971 г. В.Д. Панов защитил кандидатскую диссертацию, а в 2001 г. – докторскую в виде научного доклада на тему «Эволюция современного оледенения Кавказа».

В последние годы научная деятельность В.Д. Панова была направлена на изучение гидрометеорологического режима Юга России. Под его руководством подготовлены и изданы монографии по климату Северной Осетии-Алании, Карачаево-Черкесии, Ростовской области. В связи с разработкой проблемы строительства канала «Каспий-Дон» по Кумо-Манычской впадине он участвовал в издании монографий «Река Маныч: гидрография и сток» (2001 г.) и «Реки Западный и Восточный Маныч. Гидрография и режим стока» (2009 г.).

При непосредственном участии В.Д. Панова были подготовлены монографии «Река Кубань: гидрография и режим стока» (2005 г.), «Озера Предкавказья и Большого Кавказа» (2010 г.), «Реки Черноморского побережья Кавказа. Гидрография и режим стока» (2012 г.), «Река Терек. Гидрография и режим стока» (2015 г.) и многие другие. Всего им опубликовано 18 монографий и более 160 научных статей.

Им создана школа исследователей гидрометеорологического режима горных территорий Кавказа. Василий Данилович воспитал ряд исследователей-гляциологов. Среди них – два доктора и четыре кандидата географических наук.

В.Д. Панов многие годы был членом Секции гляциологии Межведомственного комитета при АН СССР, являлся членом диссертационного совета по географическим наукам при Южном федеральном университете со времени его основания.

Производственная и научная деятельность В.Д. Панова получила высокую оценку. Ему присвоено почетное звание «Заслуженный метеоролог Российской Федерации». Он награжден орденом Дружбы, нагрудными знаками «Отличник Гидрометслужбы СССР», «Почетный работник Гидрометеослужбы России» и «Почетный работник охраны природы России».

За научные работы он награжден премиями Росгидромета имени В.Г. Глушкова (1992 г.), В.А. Урываева (2007 г.) и имени А.И. Воейкова (2003 г.).

Память о Василии Даниловиче надолго сохранится в сердцах его коллег и учеников.

П.М. Лурье, Ю.А. Федоров

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, М.С. Шипитко

Подписано в печать 20.06.2023. Выход в свет 23.06.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 18,13. Уч.-изд. л. 20,19. Тираж 250 экз. Заказ № 9072.

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

Signed print June 20, 2023. The publication June 23, 2023. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.

Conv. print. sheets 18.13. Publ. sign. 20.19. Edition 250 copies. Order number 9072.

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