

ISSN 1026–2237

DOI 10.18522/1026–2237

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2022

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. Ворovich – 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.Б. Климентов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.И. Колесников – кандидат геогр. наук, доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
Е.М. Колосова – кандидат физ.-мат. наук, Южный федеральный университет, Россия
Г.В. Куповых – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.В. Курбатов – доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.М. Лерер – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
С.Н. Мелихов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.А. Миноранский – доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
В.В. Онищенко – доктор геогр. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия
О.В. Назаренко – кандидат геогр. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
С.Г. Парада – доктор геол.-мин. наук, доцент, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
Г.В. Пироговская – доктор с.-х. наук, профессор, Институт почвоведения и агрохимии НАН РБ, Белоруссия
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика
М.А. Сазыкина – доктор биол. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия
В.И. Силаев – доктор геол.-мин. наук, Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Россия
В.Н. Труфанов – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
П. Фатгаль – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия

Учредители:

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

Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov

Main Edition:

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

Editorial Board:

M.A. Borovskaya - Editor-in-Chief, 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. Bochkaev - 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.B. Klimentov - Doctor of Physics and Mathematics, 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: 10.18522/1026-2237-2022-2

*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 (214) 2022 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 (214) 2022*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Бештокова З.В. Разностные методы решения интегро-дифференциального уравнения конвекции-диффузии с граничными условиями третьего рода..... 4
Данилова Н.В., Житников Д.И. Метод дихотомической кластеризации и оптимальный портфель..... 15
Попов В.А. Аналитическое продолжение локально однородного и неоднородного риманова многообразия.. 21
Чебаков М.И., Колосова Е.М. Контактная задача о взаимодействии штампа в форме параболоида вращения и пороупругого слоя, закрепленного на упругом основании 28

Beshtokova Z.V. Difference Methods for Solving the Integro-Differential Convection-Diffusion Equation with Boundary Conditions of the Third Kind..... 4
Danilova N.V., Zhitnikov D.I. Dichotomous Clustering Method and Optimal Portfolio..... 15
Popov V.A. Analytic Extension of Locally Given Riemannian Manifold to Global Space 21
Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact Problem on the Interaction of a Punch in the Form of a Paraboloid of Rotation and a Poroelastic Layer Fixed on an Elastic Foundation..... 28

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

Безуглова О.С., Болдырева В.Э., Морозов И.В., Тагивердиев С.С., Горбов С.Н. Интерпретация результатов гранулометрического анализа почвы в разных школах почвоведения..... 36
Ергина Е.И., Жук В.О. Анализ и оценка процессов опустынивания в Крыму 47
Ивлиева О.В., Ма Цзя, Лю Чэнь. Динамика въездного международного туризма в основных туристических регионах Китая 53
Маканникова М.В., Лапшакова Л.А., Бельмач Н.В. Совершенствование управления земельными ресурсами в муниципальном образовании..... 62

Bezuglova O.S., Boldyreva V.E., Morozov I.V., Tagiverdiev S.S., Gorbov S.N. Interpretation of the Results of Particle Size Analysis of Soils by Various Schools of Soil Science 36
Ergina E.I., Zhuk V.O. Analysis and Assessment of Desertification Processes in the Crimea 47
Ivlieva O.V., Ma Jia, Liu Chen. Dynamics of Inbound International Tourism in the Main Tourist Regions of China 53
Makannikova M.V., Lapshakova L.A., Belmach N.V. Improvement of Land Management in the Municipality 62

<i>Морковкин Г.Г., Стребкова А.С., Максимова Н.Б., Слажнева С.С.</i> Влияние способов использования почвы на изменение содержания гумуса в чернозёмах выщелоченных умеренно засушливой и колючной степи Алтайского края	68	<i>Morkovkin G.G., Strebkova A.S., Maximova N.B., Slazhneva S.S.</i> The Influence of Soil Use Methods on the Changes in the Humus Content in Leached Chernozems of the Moderately Arid and Forest-Outlier Steppe of the Altai Territory.....	68
<i>Онищенко В.В., Дега Н.С., Эдиев А.У., Липилин Д.А.</i> Климатогенная трансформация горно-лесных ассоциаций и вектор устойчивых восстановительных сукцессий	74	<i>Onischenko V.V., Dega N.S., Ediev A.U., Lipilin D.A.</i> Climatogenic Transformation of Mountain Forest Associations and the Vector of Stable Restorative Successions.....	74
<i>Попов Ю.В., Пустовит О.Е., Левченко С.В.</i> Геодинамический комплекс апогипербазитов зоны Передового хребта Большого Кавказа	85	<i>Popov Yu.V., Pustovit O.E., Levchenko S.V.</i> Geodynamic Complex of Apohyperbasites of the Zone of the Peredovoy Ridge of the Greater Caucasus	85

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

<i>Амаева Ф.Ш., Абдурахманова А.А., Османов М.М., Ахмедова Г.А.</i> Фитоперифитонные сообщества прибрежной акватории Каспийского моря	93	<i>Amaeva F.Sh., Abdurakhmanova A.A., Osmanov M.M., Akhmedova G.A.</i> Phytoperiphytic Communities of the Caspian Littoral Zone	93
<i>Нежинская Е.Н., Безуглова О.С.</i> Новый способ определения корневой массы озимой пшеницы	103	<i>Nezhinskaya E.N., Bezuglova O.S.</i> A New Method for Determining the Root Mass of Winter Wheat	103
<i>Полин А.А., Попова Н.В., Денисова Т.В.</i> Эйдонмия и внутривидовая изменчивость морского ерша <i>Scorpaena porcus</i> Linnaeus, 1758 (Pisces: Scorpaenidae) кавказского шельфа российского сектора Черного моря.....	110	<i>Polin A.A., Popova N.V., Denisova T.V.</i> Eidonomy and Intraspecific Variability of Black Scorpionfish <i>Scorpaena porcus</i> Linnaeus, 1758 (Pisces: Scorpaenidae) from the Caucasian Shelf of the Russian Sector of the Black Sea.....	110

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

<i>Миноранский В.А.</i> Донской фестиваль экологического туризма «Воспетая степь»	123	<i>Minoransky V.A.</i> Don Ecological Tourism Festival “Glorified Steppe”	123
---	-----	---	-----

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 519.63

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-4-14

РАЗНОСТНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ КОНВЕКЦИИ-ДИФФУЗИИ С ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ ТРЕТЬЕГО РОДА

Зарьяна Владимировна Бештокова

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

Аннотация. Исследуется начально-краевая задача для многомерного уравнения конвекции-диффузии с переменными коэффициентами и граничными условиями третьего рода. Для численного решения многомерной задачи построена локально-одномерная разностная схема. Показано, что погрешность аппроксимации схемы равна $O(|h|^2 + \tau)$, где $|h|^2 = h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_p^2$. С помощью метода энергетических неравенств получена априорная оценка в L_2 -норме, откуда следуют единственность, устойчивость по правой части и начальным данным, а также сходимость решения локально-одномерной разностной схемы к решению исходной дифференциальной задачи со скоростью, равной погрешности аппроксимации. Проведены численные расчеты на тестовом примере, иллюстрирующие полученные в данной работе теоретические выкладки.

Ключевые слова: краевая задача, граничное условие третьего рода, локально-одномерная схема, априорная оценка, разностная схема, уравнение конвекции-диффузии

Для цитирования: Бештокова З.В. Разностные методы решения интегро-дифференциального уравнения конвекции-диффузии с граничными условиями третьего рода // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 4–14.

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

Original article

DIFFERENCE METHODS FOR SOLVING THE INTEGRO-DIFFERENTIAL CONVECTION-DIFFUSION EQUATION WITH BOUNDARY CONDITIONS OF THE THIRD KIND

Zaryana V. Beshtokova

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

Abstract. An initial-boundary value problem for a multidimensional integro-differential convection-diffusion equation with variable coefficients and boundary conditions of the third kind is investigated. For the numerical solution of the multidimensional problem, a locally one-dimensional difference scheme is constructed. It is shown

that the approximation error of the scheme is $O(|h|^2 + \tau)$, where $|h|^2 = h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_p^2$. Using the method of energy inequalities, we obtain an a priori estimate in the L_2 - norm, which implies uniqueness, stability with respect to the right-hand side and initial data, and convergence of the solution of the locally one-dimensional difference scheme to the solution of the original differential problem at a rate equal to the approximation error. Numerical calculations are carried out on a test example, illustrating the theoretical calculations obtained in this work.

Keywords: boundary value problem, boundary condition of the third kind, locally one-dimensional scheme, a priori estimate, difference scheme, convection-diffusion equation

For citation: Beshtokova Z.V. Difference Methods for Solving the Integro-Differential Convection-Diffusion Equation with Boundary Conditions of the Third Kind. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(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

Большое практическое значение имеют задачи, связанные с исследованием физических процессов, приводящих к математическим моделям, в основе которых лежит уравнение параболического типа.

С точки зрения численной реализации в отличие от одномерных задач при изучении многомерных задач возникает сложность, заключающаяся в значительном увеличении объёма вычислений. В этой связи актуальное значение приобретает задача построения экономичных разностных схем для численного решения многомерных задач, обладающих возможностью достаточно эффективной стабилизации решений (устойчивостью) и требующих при переходе со слоя на слой затраты числа арифметических операций Q , пропорционального числу узлов сетки, так что $Q = O(\frac{1}{h^p})$, где $h_i = \min_{1 \leq i \leq p} h_i$; p – размерность пространства; h_i – шаг сетки по направлению x_i .

Целью и новизной настоящей работы является построение локально-одномерной (экономичной) разностной схемы (ЛОРС) для численного решения начально-краевой задачи для многомерного интегро-дифференциального уравнения конвекции-диффузии с переменными коэффициентами и граничными условиями третьего рода. Основная идея построения ЛОРС состоит в сведении перехода со слоя на слой к последовательному решению ряда одномерных задач по каждому из координатных направлений. При этом каждая из промежуточных задач может не аппроксимировать исходную дифференциальную задачу, а в совокупности и в специальных нормах имеет место такая аппроксимация. Указанные методы названы методами расщепления, которые были развиты в работах J. Douglas, D.W. Peaceman, H.H. Rachford [1, 2], H.H. Яненко [3], А.А. Самарского [4–6], Г.И. Марчука [7], Е.Г. Дьяконова [8, 9] и др.

Построению локально-одномерных схем для численного решения многомерных параболических уравнений посвящены работы [4–10].

Для уравнения параболического типа в p -мерном прямоугольном параллелепипеде и для гиперболического уравнения при $p = 2, 3$ с краевыми условиями III рода в работе [11] исследуется разностная аппроксимация граничных условий, а в [12] – ЛОРС.

Настоящая работа является продолжением серии работ автора [13, 14], посвященных изучению локальных и нелокальных краевых задач для многомерных параболических уравнений.

Постановка задачи

В замкнутой области $\bar{Q}_T = \bar{G} \times [0 \leq t \leq T]$, основанием которой является p -мерный прямоугольный параллелепипед $\bar{G} = \{x = (x_1, x_2, \dots, x_p): 0 \leq x_\alpha \leq l_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, p\}$, с границей Γ , $\bar{G} = G \cup \Gamma$, рассматривается задача

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Lu + f(x, t), \quad (x, t) \in Q_T, \quad (1)$$

$$\begin{cases} k_\alpha(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} = \beta_{-\alpha} u - \mu_{-\alpha}(x, t), & x_\alpha = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \\ -k_\alpha(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} = \beta_{+\alpha} u - \mu_{+\alpha}(x, t), & x_\alpha = l_\alpha, \quad 0 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (2)$$

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad x \in \bar{G}, \quad (3)$$

где $Lu = \sum_{\alpha=1}^p L_\alpha u$; $L_\alpha u = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(k_\alpha(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} \right) + r_\alpha(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} - q_\alpha(x, t) u - \int_0^{x_\alpha} \rho_\alpha(x, t) u dx_\alpha$,
 $0 < c_0 \leq k_\alpha(x, t) \leq c_1$; $|r_\alpha(x, t)|, |k_{x_\alpha}(x, t)|, |r_{x_\alpha}(x, t)|, |q_\alpha(x, t)|, |\rho_\alpha(x, t)|, |\beta_{\pm\alpha}(x, t)| \leq c_2$;
 $u(x, t) \in C^{4,2}(\bar{Q}_T)$, $k_\alpha(x, t) \in C^{3,1}(\bar{Q}_T)$; $r_\alpha(x, t), q_\alpha(x, t), f_\alpha(x, t), \rho_\alpha(x, t) \in C^{2,1}(\bar{Q}_T)$; c_0, c_1, c_2 –
 положительные постоянные; $Q_T = G \times (0 < t \leq T]$.

Далее через $M_i, i = 1, 2, \dots$ обозначаются положительные постоянные, зависящие только от входных данных рассматриваемой задачи.

Построение локально-одномерной схемы

Пространственную сетку выберем равномерной по каждому направлению Ox_α с шагом $h_\alpha = \frac{l_\alpha}{N_\alpha}, \alpha = 1, 2, \dots, p$:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_h &= \prod_{\alpha=1}^p \bar{\omega}_{h_\alpha}, \quad \bar{\omega}_{h_\alpha} = \{x_\alpha^{(i_\alpha)} = i_\alpha h_\alpha; i_\alpha = 0, 1, \dots, N_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, p\}, \\ \bar{h}_\alpha &= \begin{cases} h_\alpha, & i_\alpha = 1, 2, \dots, N_\alpha - 1, \\ \frac{h_\alpha}{2}, & i_\alpha = 0, N_\alpha. \end{cases} \end{aligned}$$

По аналогии с [15] на отрезке $[0, T]$ также введём равномерную сетку $\bar{\omega}_\tau = \{t_j = j\tau, j = 0, 1, \dots, j_0\}$ с шагом $\tau = T/j_0$. Каждый из отрезков $[t_j, t_{j+1}]$ разобьём на p частей, введя точки $t_{j+\frac{\alpha}{p}} = t_j + \tau \frac{\alpha}{p}, \alpha = 1, 2, \dots, p-1$. Обозначим через $\Delta_\alpha = (t_{j+\frac{\alpha-1}{p}}, t_{j+\frac{\alpha}{p}})$ полуинтервал, где $\alpha = 1, 2, \dots, p$.

Уравнение (1) перепишем в виде $\sum_{\alpha=1}^p E_\alpha u = 0, E_\alpha u = \frac{1}{p} \frac{\partial u}{\partial t} - L_\alpha u - f_\alpha$, где $f_\alpha(x, t)$ – произвольные функции, обладающие той же гладкостью, что и $f(x, t)$, удовлетворяющие условию нормировки $\sum_{\alpha=1}^p f_\alpha = f$.

На каждом полуинтервале $\Delta_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, p$, будем последовательно решать задачи

$$E_\alpha \vartheta_\alpha = \frac{1}{p} \frac{\partial \vartheta_\alpha}{\partial t} - L_\alpha \vartheta_\alpha - f_\alpha = 0, \quad x \in G, \quad t \in \Delta_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, p, \quad (4)$$

$$\begin{cases} k_\alpha \frac{\partial \vartheta_\alpha}{\partial x_\alpha} = \beta_{-\alpha} \vartheta_\alpha - \mu_{-\alpha}(x, t), & x_\alpha = 0, \\ -k_\alpha \frac{\partial \vartheta_\alpha}{\partial x_\alpha} = \beta_{+\alpha} \vartheta_\alpha - \mu_{+\alpha}(x, t), & x_\alpha = l_\alpha, \end{cases} \quad (5)$$

полагая при этом [15, с. 522] $\vartheta_\alpha^j(x, t_{j+\frac{\alpha-1}{p}}) = \vartheta_{(\alpha-1)}^j(x, t_{j+\frac{\alpha-1}{p}}), \alpha = 2, 3, \dots, p, j = 1, 2, \dots, j_0$,

$\vartheta_{(1)}^j(x, t_j) = \vartheta_{(p)}^{j-1}(x, t_j), j = 2, \dots, j_0, \vartheta_{(1)}^1(x, 0) = u_0(x), \vartheta_{(\alpha)}^0(x, 0) = u_0(x)$.

Аналогично [15, с. 401] получим для уравнения (4) номера α монотонную схему второго порядка аппроксимации по h_α . Для этого рассмотрим последнее уравнение при фиксированном α с возмущенным оператором \tilde{L}_α :

$$\frac{1}{p} \frac{\partial \vartheta_\alpha}{\partial t} = \tilde{L}_\alpha \vartheta_\alpha + f_\alpha, \quad t \in \Delta_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, p, \quad (6)$$

где $\tilde{L}_\alpha \vartheta_\alpha = \kappa_\alpha \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(k_\alpha(x, t) \frac{\partial \vartheta_\alpha}{\partial x_\alpha} \right) + r_\alpha(x, t) \frac{\partial \vartheta_\alpha}{\partial x_\alpha} - q_\alpha(x, t) \vartheta_\alpha - \int_0^{x_\alpha} \rho_\alpha(x, t) u dx_\alpha$; $\kappa_\alpha = \frac{1}{1+R_\alpha}$;
 $R_\alpha = \frac{0,5h_\alpha|r_\alpha|}{k_\alpha}$ – разностное число Рейнольдса; $r_\alpha^+ = 0,5(r_\alpha + |r_\alpha|) \geq 0$; $r_\alpha^- = 0,5(r_\alpha - |r_\alpha|) \leq 0$;
 $b_\alpha^+ = \frac{r_\alpha^+}{k_\alpha}$; $b_\alpha^- = \frac{r_\alpha^-}{k_\alpha}$; $r_\alpha = r_\alpha^+ + r_\alpha^-$; $a^{(1\alpha)} = a_{i_\alpha+1}$; $r_\alpha = r_\alpha(x_{i_\alpha}, \bar{t})$; $\rho_\alpha = \rho_\alpha(x_{i_\alpha}, \bar{t})$;
 $a_\alpha = k_\alpha(x_{i_\alpha-1/2}, \bar{t}) = k_\alpha(x_1, \dots, x_{i_\alpha-1}, x_\alpha - 0,5h_\alpha, x_{i_\alpha+1}, \dots, x_p, \bar{t})$; $d_\alpha = q_\alpha(x_{i_\alpha}, \bar{t})$; $\varphi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}} = f_\alpha(x, \bar{t})$;
 $\bar{t} = t^{j+\frac{1}{2}}$.

Аппроксимируем каждое уравнение (6) номера α неявной двухслойной схемой на полуинтервале $(t_{j+\frac{\alpha-1}{p}}, t_{j+\frac{\alpha}{p}}]$, тогда получим цепочку из p одномерных разностных уравнений:

$$\frac{y^{j+\frac{\alpha}{p}} - y^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \tilde{\Lambda}_\alpha y^{j+\frac{\alpha}{p}} + \varphi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, p, \quad x_\alpha \in \omega_{h_\alpha}, \quad (7)$$

$$\tilde{\Lambda}_\alpha y = \kappa_\alpha (a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}})_{x_\alpha} + b_\alpha^+ a_\alpha^{(+1\alpha)} y_{x_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} + b_\alpha^- a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} - d_\alpha y^{j+\frac{\alpha}{p}} - \sum_{i_\alpha=0}^{i_\alpha} p_\alpha y_{i_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} \hbar_\alpha.$$

Запишем теперь разностный аналог для граничных условий (2)

$$\begin{cases} a_\alpha^{(1\alpha)} y_{x_\alpha,0}^{j+\frac{\alpha}{p}} = \beta_{-\alpha} y_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - \mu_{-\alpha}, & x_\alpha = 0, \\ -a_\alpha^{(N\alpha)} y_{\bar{x}_\alpha, N_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} = \beta_{+\alpha} y_{N_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \mu_{+\alpha}, & x_\alpha = l_\alpha. \end{cases} \quad (8)$$

Условия (8) имеют порядок аппроксимации $O(h_\alpha)$. Повысим его до $O(h_\alpha^2)$ на решениях уравнения (4) при каком-либо α :

$$\begin{aligned} k^{(\alpha)} \vartheta'_{(\alpha),0} &= a_\alpha^{(1\alpha)} \vartheta_{x_\alpha,0}^{j+\frac{\alpha}{p}} - 0,5 h_\alpha (k^{(\alpha)} \vartheta'_{(\alpha)})' + O(h_\alpha^2) = a_\alpha^{(1\alpha)} \vartheta_{x_\alpha,0}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \\ &- 0,5 h_\alpha \left(\frac{1}{p} \frac{\partial \vartheta^{j+\frac{\alpha}{p}}}{\partial t} - r_\alpha \frac{\partial \vartheta_{(\alpha)}}{\partial x_\alpha} + q_\alpha \vartheta_{(\alpha)} + \int_0^{x_\alpha} \rho_\alpha \vartheta_{(\alpha)} dx_\alpha - f_\alpha \right)_0 + O(h_\alpha^2). \end{aligned}$$

Итак,

$$\begin{aligned} a_\alpha^{(1\alpha)} \vartheta_{x_\alpha,0}^{j+\frac{\alpha}{p}} - 0,5 h_\alpha \left(\frac{1}{p} \vartheta_{\bar{t}}^{j+\frac{\alpha}{p}} - r_\alpha \frac{\partial \vartheta_{(\alpha)}}{\partial x_\alpha} + q_\alpha \vartheta_{(\alpha)} + \sum_{i_\alpha=0}^{i_\alpha} p_\alpha \vartheta_{i_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha - f_\alpha \right)_0 = \\ = \beta_{-\alpha} \vartheta_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - \mu_{-\alpha} + O(h_\alpha^2) + O(h_\alpha \tau). \end{aligned} \quad (9)$$

В (9) отбросим величины порядка малости $O(h_\alpha^2)$ и $O(h_\alpha \tau)$, заменим $\vartheta_{(\alpha)}$ на $y_{(\alpha)} = y^{j+\frac{\alpha}{p}}$, тогда

$$(9) \text{ переписывается так: } 0,5 h_\alpha \frac{y_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - y_0^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \kappa_{-\alpha} a_\alpha^{(1\alpha)} y_{x_\alpha,0}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \bar{\beta}_{-\alpha} y_0^{j+\frac{\alpha}{p}} + \bar{\mu}_{-\alpha}, \quad x_\alpha = 0,$$

$$0,5 h_\alpha \frac{y_{N_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} - y_{N_\alpha}^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = -\kappa_{+\alpha} a_\alpha^{(N\alpha)} y_{\bar{x}_\alpha, N_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \bar{\beta}_{+\alpha} y_{N_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} - 0,5 h_\alpha \sum_{i_\alpha=0}^{N_\alpha} p_\alpha y_{i_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha + \bar{\mu}_{+\alpha}, \quad x_\alpha = l_\alpha,$$

где $\bar{\mu}_{-\alpha} = \mu_{-\alpha} + 0,5 h_\alpha f_{\alpha,0}$; $\bar{\mu}_{+\alpha} = \mu_{+\alpha} + 0,5 h_\alpha f_{\alpha, N_\alpha}$; $\mu_{\pm\alpha} = \mu_{\pm\alpha}(t_j)$; $\bar{\beta}_{-\alpha} = \beta_{-\alpha} + 0,5 h_\alpha d_\alpha^{(0)}$; $\bar{\beta}_{+\alpha} = \beta_{+\alpha} + 0,5 h_\alpha d_\alpha^{(N\alpha)}$; $\kappa_{-\alpha} = \frac{1}{1 + \frac{0,5 h_\alpha |r_\alpha^{(0)}|}{k_\alpha^{(0,5)}}}$; $r_\alpha^{(0)} \leq 0$; $\kappa_{+\alpha} = \frac{1}{1 + \frac{0,5 h_\alpha |r_\alpha^{(N\alpha)}|}{k_\alpha^{(N\alpha-0,5)}}}$; $r_\alpha^{(N\alpha)} \geq 0$.

Таким образом, приходим к цепочке одномерных схем

$$\frac{y^{j+\frac{\alpha}{p}} - y^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \tilde{\Lambda}_\alpha y^{j+\frac{\alpha}{p}} + \varphi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, p, \quad x_\alpha \in \omega_{h_\alpha}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0,5 h_\alpha \frac{y^{j+\frac{\alpha}{p}} - y^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \Lambda_\alpha^- y^{(\alpha)} + \bar{\mu}_{-\alpha}, & x_\alpha = 0, \\ 0,5 h_\alpha \frac{y^{j+\frac{\alpha}{p}} - y^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \Lambda_\alpha^+ y^{(\alpha)} + \bar{\mu}_{+\alpha}, & x_\alpha = l_\alpha, \end{cases} \quad (11)$$

$$y(x, 0) = u_0(x), \quad (12)$$

где $\tilde{\Lambda}_\alpha y^{(\alpha)} = \kappa_\alpha (a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)})_{x_\alpha} + b_\alpha^+ a_\alpha^{(+1\alpha)} y_{x_\alpha}^{(\alpha)} + b_\alpha^- a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)} - d_\alpha y^{(\alpha)} - \sum_{i_\alpha=0}^{i_\alpha} p_\alpha y_{i_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha$;

$$\Lambda_\alpha^- y^{(\alpha)} = \kappa_{-\alpha} a_\alpha^{(1\alpha)} y_{x_\alpha,0}^{(\alpha)} - \bar{\beta}_{-\alpha} y_0^{(\alpha)}; \quad x_\alpha = 0; \quad \frac{1}{p} y_{\bar{t}}^{(\alpha)} = \frac{y^{j+\frac{\alpha}{p}} - y^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau};$$

$$\Lambda_\alpha^+ y^{(\alpha)} = -\kappa_{+\alpha} a_\alpha^{(N\alpha)} y_{\bar{x}_\alpha, N_\alpha}^{(\alpha)} - \bar{\beta}_{+\alpha} y_{N_\alpha}^{(\alpha)} - 0,5 h_\alpha \sum_{i_\alpha=0}^{N_\alpha} p_\alpha y_{i_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha, \quad x_\alpha = l_\alpha.$$

Задачу (10)–(12) перепишем в операторном виде

$$\frac{y^{j+\frac{\alpha}{p}} - y^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \bar{\Lambda}_\alpha y^{(\alpha)} + \Phi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, p, \quad x \in \bar{\omega}_{h_\alpha}, \quad y(x, 0) = u_0(x); \quad (13)$$

$$\text{где } \bar{\Lambda}_\alpha y^{(\alpha)} = \begin{cases} \bar{\Lambda}_\alpha y^{(\alpha)}, & x_\alpha \in \omega_{h_\alpha}, \\ \frac{1}{0,5h_\alpha} \bar{\Lambda}_\alpha^- y^{(\alpha)}, & x_\alpha = 0, \\ \frac{1}{0,5h_\alpha} \bar{\Lambda}_\alpha^+ y^{(\alpha)}, & x_\alpha = l_\alpha, \end{cases} \quad \Phi_\alpha = \begin{cases} \varphi_\alpha, & x_\alpha \in \omega_{h_\alpha}, \\ \frac{1}{0,5h_\alpha} \bar{\mu}_{-\alpha}, & x_\alpha = 0, \\ \frac{1}{0,5h_\alpha} \bar{\mu}_{+\alpha}, & x_\alpha = l_\alpha. \end{cases}$$

Погрешность аппроксимации локально-одномерной схемы

Характеристикой точности решения локально-одномерной схемы является разность $z^{j+\frac{\alpha}{p}} = y^{j+\frac{\alpha}{p}} - u^{j+\frac{\alpha}{p}}$, где $u^{j+\frac{\alpha}{p}}$ – решение исходной задачи (1)–(3). Подставляя $y^{j+\frac{\alpha}{p}} = z^{j+\frac{\alpha}{p}} + u^{j+\frac{\alpha}{p}}$ в задачу (10)–(12), получим задачу для погрешности $z^{j+\frac{\alpha}{p}}$: $\frac{z^{j+\frac{\alpha}{p}} - z^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \bar{\Lambda}_\alpha z^{j+\frac{\alpha}{p}} + \psi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}}$,

$$x_\alpha \in \omega_{h_\alpha}, \text{ где } \psi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}} = \bar{\Lambda}_\alpha u^{j+\frac{\alpha}{p}} + \varphi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}} - \frac{u^{j+\frac{\alpha}{p}} - u^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau}.$$

Обозначив через $\psi_\alpha^0 = \left(L_\alpha u + f_\alpha - \frac{1}{p} \frac{\partial u}{\partial t}\right)^{j+1/2}$ и замечая, что $\sum_{\alpha=1}^p \psi_\alpha^0 = 0$, если $\sum_{\alpha=1}^p f_\alpha = f$, представим погрешность в виде $\psi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}} = \psi_\alpha^0 + \psi_\alpha^*$:

$$\begin{aligned} \psi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}} &= \bar{\Lambda}_\alpha u^{j+\frac{\alpha}{p}} + \varphi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}} - \frac{u^{j+\frac{\alpha}{p}} - u^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} + \psi_\alpha^0 - \psi_\alpha^0 = \left(\bar{\Lambda}_\alpha u^{j+\frac{\alpha}{p}} - L_\alpha u^{j+\frac{1}{2}}\right) + \\ &+ \left(\varphi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}} - f_\alpha^{j+\frac{1}{2}}\right) - \left(\frac{u^{j+\frac{\alpha}{p}} - u^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} - \frac{1}{p} \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^{j+1/2}\right) + \psi_\alpha^0 = \psi_\alpha^0 + \psi_\alpha^*. \end{aligned}$$

Очевидно, что $\psi_\alpha^* = O(h_\alpha^2 + \tau)$, $\psi_\alpha^0 = O(1)$, $\sum_{\alpha=1}^p \psi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}} = \sum_{\alpha=1}^p \psi_\alpha^0 + \sum_{\alpha=1}^p \psi_\alpha^* = O(|h|^2 + \tau)$. Запишем граничное условие $x_\alpha = 0$ так:

$$0,5h_\alpha \frac{y_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - y_0^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \kappa_{-\alpha} a_\alpha^{(1\alpha)} y_{x_{\alpha,0}}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \bar{\beta}_{-\alpha} y_0^{j+\frac{\alpha}{p}} + 0,5h_\alpha f_{\alpha,0} + \mu_{-\alpha}.$$

Пусть $z^{j+\frac{\alpha}{p}} = y^{j+\frac{\alpha}{p}} - u^{j+\frac{\alpha}{p}}$, где u – решение исходной дифференциальной задачи (1)–(3).

Подставляя $y^{j+\frac{\alpha}{p}} = z^{j+\frac{\alpha}{p}} + u^{j+\frac{\alpha}{p}}$, получим $0,5h_\alpha \frac{z_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - z_0^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \kappa_{-\alpha} a_\alpha^{(1\alpha)} z_{x_{\alpha,0}}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \bar{\beta}_{-\alpha} z_0^{j+\frac{\alpha}{p}} + \kappa_{-\alpha} a_\alpha^{(1\alpha)} u_{x_{\alpha,0}}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \bar{\beta}_{-\alpha} u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - 0,5h_\alpha \frac{u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - u_0^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} + 0,5h_\alpha f_{\alpha,0} + \mu_{-\alpha}$. К правой части полученного выражения добавим и вычтем

$$0,5h_\alpha \psi_\alpha^0 = 0,5h_\alpha \left[\frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\kappa_\alpha \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} \right) + r_\alpha(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} - q_\alpha u - \int_0^{x_\alpha} \rho_\alpha u dx_\alpha + f_\alpha - \frac{1}{p} \frac{\partial u}{\partial t} \right]_{x_\alpha=0}^{j+1/2}.$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \psi_{-\alpha} &= 0,5h_\alpha \left(f_{\alpha,0} - \frac{u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - u_0^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} \right) + \kappa_{-\alpha} a_\alpha^{(1\alpha)} u_{x_{\alpha,0}}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \beta_{-\alpha} u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - 0,5h_\alpha d_{\alpha,0} u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} + \mu_{-\alpha} - \\ &- 0,5h_\alpha \left[\frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\kappa_\alpha \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} \right) + r_\alpha(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} - q_\alpha u - \int_0^{x_\alpha} \rho_\alpha u dx_\alpha + f_\alpha - \frac{1}{p} \frac{\partial u}{\partial t} \right]_{x_\alpha=0}^{j+1/2} + 0,5h_\alpha \psi_\alpha^0 = \\ &= 0,5h_\alpha \left(f_{\alpha,0} - \frac{u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - u_0^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} \right) + a_\alpha^{(1\alpha)} u_{x_{\alpha,0}}^{j+\frac{\alpha}{p}} + 0,5h_\alpha r_\alpha^{(0)} u_{x_{\alpha,0}}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \beta_{-\alpha} u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - 0,5h_\alpha d_{\alpha,0} u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} + \mu_{-\alpha} - \\ &- 0,5h_\alpha \left[\frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\kappa_\alpha \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} \right) \right]_{x_\alpha=0}^{j+1/2} - 0,5h_\alpha \left(f_{\alpha,0} - \frac{u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - u_0^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} \right) + 0,5h_\alpha q_{\alpha,0} u_0^{j+\frac{1}{2}} - 0,5h_\alpha r_\alpha^{(0)} u_{x_{\alpha,0}}^{j+\frac{1}{2}} + \\ &0,5h_\alpha \psi_\alpha^0 + \end{aligned}$$

$$+ O(h_\alpha \tau) = \left(\kappa_\alpha \frac{\partial u^{j+\frac{\alpha}{p}}}{\partial x_\alpha} - \beta_{-\alpha} u_0^{j+\frac{\alpha}{p}} + \mu_{-\alpha} \right)_{x_\alpha=0} + 0,5h_\alpha \psi_\alpha^0 + O(h_\alpha^2) + O(h_\alpha \tau).$$

В силу граничных условий (2) выражение, стоящее в скобках, есть ноль. Поэтому $\psi_{-\alpha} = 0,5h_\alpha \psi_{-\alpha}^0 + \psi_{-\alpha}^*$, $\psi_{-\alpha}^* = O(h_\alpha^2 + \tau) + O(h_\alpha \tau)$.

Имеем

$$0,5h_\alpha \frac{z_0^{j+\frac{\alpha}{p}} - z_0^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \kappa_{-\alpha} a_\alpha^{(1\alpha)} z_{x_\alpha,0}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \bar{\beta}_{-\alpha} z_0^{j+\frac{\alpha}{p}} + 0,5h_\alpha \psi_{-\alpha}^0 + \psi_{-\alpha}^*,$$

$$0,5h_\alpha \frac{z_{N_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} - z_{N_\alpha}^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = -\kappa_{+\alpha} a_\alpha^{(N_\alpha)} z_{\bar{x}_\alpha, N_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} - \bar{\beta}_{+\alpha} z_{N_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} - 0,5h_\alpha \sum_{i_\alpha=0}^{N_\alpha} p_\alpha z_{i_\alpha}^{j+\frac{\alpha}{p}} \hbar_\alpha + 0,5h_\alpha \psi_{+\alpha}^0 + \psi_{+\alpha}^*.$$

Итак, задачу для погрешности $z^{j+\frac{\alpha}{p}}$ запишем в виде

$$\frac{z^{j+\frac{\alpha}{p}} - z^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \tilde{\Lambda}_\alpha z^{j+\frac{\alpha}{p}} + \psi_\alpha^{j+\frac{\alpha}{p}}, \quad x_\alpha \in \omega_{h_\alpha}, \quad (14)$$

$$0,5h_\alpha \frac{z^{j+\frac{\alpha}{p}} - z^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \Lambda_\alpha^- z^{(\alpha)} + \psi_{-\alpha}, \quad x_\alpha = 0, \quad 0,5h_\alpha \frac{z^{j+\frac{\alpha}{p}} - z^{j+\frac{\alpha-1}{p}}}{\tau} = \Lambda_\alpha^+ z^{(\alpha)} + \psi_{+\alpha}, \quad x_\alpha = l_\alpha,$$

$$z(x, 0) = 0,$$

где $\psi_\alpha = \psi_\alpha^0 + \psi_\alpha^*$; $\psi_\alpha^0 = O(1)$; $\psi_\alpha^* = O(h_\alpha^2 + \tau)$; $\psi_{-\alpha} = 0,5h_\alpha \psi_{-\alpha}^0 + \psi_{-\alpha}^*$; $\psi_{+\alpha} = 0,5h_\alpha \psi_{+\alpha}^0 + \psi_{+\alpha}^*$; $\psi_{\pm\alpha} = O(h_\alpha^2 + \tau)$; $\psi_{\pm\alpha}^0 = O(1)$; $\sum_{\alpha=1}^p \psi_{\pm\alpha}^0 = 0$.

Устойчивость локально-одномерной схемы

Умножим уравнение (13) скалярно на $y^{(\alpha)} = y^{j+\frac{\alpha}{p}}$:

$$\left[\frac{1}{p} y_{\bar{t}}^{(\alpha)}, y^{(\alpha)} \right]_\alpha - [\bar{\Lambda}_\alpha y^{(\alpha)}, y^{(\alpha)}]_\alpha = [\Phi^{(\alpha)}, y^{(\alpha)}]_\alpha, \quad (15)$$

где $[u, v] = \sum_{x \in \bar{\omega}_h} uvH$; $H = \prod_{\alpha=1}^p \hbar_\alpha$; $[u, v]_\alpha = \sum_{i_\alpha=0}^{N_\alpha} u_{i_\alpha} v_{i_\alpha} \hbar_\alpha$; $\|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2 = \sum_{i_\alpha=0}^{N_\alpha} y_{i_\alpha}^2 \hbar_\alpha$; $\|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 = \sum_{i_\beta \neq i_\alpha} \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2 H/\hbar_\alpha$.

Преобразуем каждое слагаемое тождества (15):

$$\left[\frac{1}{p} y_{\bar{t}}^{(\alpha)}, y^{(\alpha)} \right]_\alpha = \frac{1}{2p} (\|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2)_{\bar{t}} + \frac{\tau}{2p} \|y_{\bar{t}}\|_{L_2(\alpha)}^2, \quad (16)$$

где $\|\cdot\|_{L_2(\alpha)}$ означает, что норма берется по переменной x_α при фиксированных значениях остальных переменных.

$$\begin{aligned} [\bar{\Lambda}_\alpha y^{(\alpha)}, y^{(\alpha)}]_\alpha &= (\tilde{\Lambda}_\alpha y^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha + \Lambda_\alpha^- y^{(\alpha)} y_0^{(\alpha)} + \Lambda_\alpha^+ y^{(\alpha)} y_{N_\alpha}^{(\alpha)} = \\ &= (\kappa_\alpha (a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)})_{x_\alpha}, y^{(\alpha)})_\alpha + (b_\alpha^+ a_\alpha^{(+1\alpha)} y_{x_\alpha}^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha + (b_\alpha^- a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha - \\ &\quad - (d_\alpha y^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha - (\sum_{i_\alpha=0}^{i_\alpha} p_\alpha y_{i_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha, y^{(\alpha)})_\alpha + (\kappa_{-\alpha} a_\alpha^{(1\alpha)} y_{x_\alpha,0}^{(\alpha)} - \bar{\beta}_{-\alpha} y^{(\alpha)}) y_0^{(\alpha)} - \\ &\quad - (\kappa_{+\alpha} a_\alpha^{(N_\alpha)} y_{\bar{x}_\alpha, N_\alpha}^{(\alpha)} + \bar{\beta}_{+\alpha} y_{N_\alpha}^{(\alpha)}) y_{N_\alpha}^{(\alpha)} - y_{N_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha \sum_{i_\alpha=0}^{N_\alpha} p_\alpha y_{i_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha. \end{aligned} \quad (17)$$

Используя первую разностную формулу Грина [15, с. 99], выражение (17) перепишем в виде

$$\begin{aligned} [\bar{\Lambda}_\alpha y^{(\alpha)}, y^{(\alpha)}]_\alpha &= -(\kappa^{-1} a_\alpha, y_{\bar{x}_\alpha}^2)_\alpha + (b_\alpha^+ a_\alpha^{(+1\alpha)} y_{x_\alpha}^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha + \\ &\quad + (b_\alpha^- a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha - (d_\alpha y^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha - [\sum_{i_\alpha=0}^{i_\alpha} p_\alpha y_{i_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha, y^{(\alpha)}]_\alpha - \\ &\quad - (a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)}, \kappa_{\bar{x}} y^{(\alpha)})_\alpha - \bar{\beta}_{-\alpha} y_0^2 - \bar{\beta}_{+\alpha} y_{N_\alpha}^2, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} [\Phi^{(\alpha)}, y^{(\alpha)}]_\alpha &= (\varphi^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha + \bar{\mu}_{-\alpha} y_0^{(\alpha)} \hbar_\alpha + \bar{\mu}_{+\alpha} y_{N_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha = \\ &= (\varphi^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha + (\mu_{-\alpha} + 0,5h_\alpha f_{\alpha,0}) y_0^{(\alpha)} \hbar_\alpha + (\mu_{+\alpha} + 0,5h_\alpha f_{\alpha, N_\alpha}) y_{N_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha = \\ &= [\varphi^{(\alpha)}, y^{(\alpha)}]_\alpha + \mu_{-\alpha} y_0^{(\alpha)} + \mu_{+\alpha} y_{N_\alpha}^{(\alpha)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Оценивая с помощью леммы 1 из [16] слагаемые, входящие в правую часть (18), получим

$$\begin{aligned} -(\kappa^{-1} a_\alpha, y_{\bar{x}_\alpha}^2)_\alpha &\leq -M_1 \|y_{\bar{x}_\alpha}\|_{L_2(\alpha)}^2, \\ -(a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)}, \kappa_{\bar{x}} y^{(\alpha)})_\alpha &+ (b_\alpha^+ a_\alpha^{(+1\alpha)} y_{x_\alpha}^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha + (b_\alpha^- a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)}, y^{(\alpha)})_\alpha \leq \\ &\leq M_2 (\varepsilon \|y_{\bar{x}_\alpha}\|_{L_2(\alpha)}^2 + \frac{1}{4\varepsilon} \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2), \\ -(d_\alpha, (y^{(\alpha)})^2)_\alpha &\leq c_2 \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [\sum_{i'_\alpha=0}^{i_\alpha} p_\alpha y_{i'_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha, y^{(\alpha)}]_\alpha \leq [\frac{1}{2}, (y^{(\alpha)})^2]_\alpha + [\frac{1}{2}, (\sum_{i'_\alpha=0}^{i_\alpha} p_\alpha y_{i'_\alpha}^{(\alpha)} \hbar_\alpha)^2]_\alpha \leq \frac{1}{2} \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2 + \\ & + c_2^2 \frac{l_\alpha}{2} \sum_{i'_\alpha=0}^{N_\alpha} \hbar_\alpha \sum_{i'_\alpha=0}^{i_\alpha} y_{i'_\alpha}^2 \hbar_\alpha \leq \frac{1}{2} \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2 + c_2^2 \frac{l_\alpha}{2} \sum_{i'_\alpha=0}^{N_\alpha} y_{i'_\alpha}^2 \hbar_\alpha \leq M_3 \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2, \\ & \bar{\beta}_{-\alpha} y_0^2 + \bar{\beta}_{+\alpha} y_{N_\alpha}^2 \leq (1 + 0,5h_\alpha) c_2 (y_0^2 + y_{N_\alpha}^2) \leq M_3 (\varepsilon \|y_{\bar{x}_\alpha}\|_{L_2(\alpha)}^2 + c(\varepsilon) \|y\|_{L_2(\alpha)}^2), \\ & [\varphi^{(\alpha)}, y^{(\alpha)}]_\alpha \leq \frac{1}{2} \|\varphi^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2 + \frac{1}{2} \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2, \\ & \mu_{-\alpha} y_0^{(\alpha)} + \mu_{+\alpha} y_{N_\alpha}^{(\alpha)} \leq \frac{\mu_{-\alpha}^2}{2} + \frac{\mu_{+\alpha}^2}{2} + \frac{1}{2} [(y_0^{(\alpha)})^2 + (y_{N_\alpha}^{(\alpha)})^2] \leq \frac{1}{2} (\mu_{-\alpha}^2 + \mu_{+\alpha}^2) + \\ & + \varepsilon \|y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2 + c(\varepsilon) \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\alpha)}^2, \end{aligned}$$

где $\varepsilon > 0, c(\varepsilon) = \frac{1}{l_\alpha} + \frac{1}{\varepsilon}$.

Подставляя полученные оценки после суммирования по $i_\beta \neq i_\alpha, \beta = 1, 2, \dots, p$ в тождество (15), находим

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2p} (\|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2)_{\bar{t}} + M_1 \|y_{\bar{x}_\alpha}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq \frac{1}{2} \|\varphi^{(\alpha)}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \\ & + \varepsilon M_4 \|y_{\bar{x}_\alpha}^{(\alpha)}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + M_5 (\varepsilon) \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i_\beta \neq i_\alpha} (\mu_{-\alpha}^2 + \mu_{+\alpha}^2) \frac{H}{\hbar_\alpha}. \end{aligned} \quad (20)$$

Выбирая $\varepsilon \leq \frac{M_1}{M_4}$, из (20) находим

$$\frac{1}{2p} (\|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2)_{\bar{t}} \leq M_5 \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \frac{1}{2} \left(\|\varphi^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{i_\beta \neq i_\alpha} (\mu_{-\alpha}^2(t_j) + \mu_{+\alpha}^2(t_j)) \frac{H}{\hbar_\alpha} \right). \quad (21)$$

Просуммируем (21) сначала по $\alpha = 1, 2, \dots, p$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2p} (\|y\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2)_{\bar{t}} \leq \\ & \leq M_5 \sum_{\alpha=1}^p \|y^{(\alpha)}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^p \left(\|\varphi^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{i_\beta \neq i_\alpha} (\mu_{-\alpha}^2(t_j) + \mu_{+\alpha}^2(t_j)) \frac{H}{\hbar_\alpha} \right), \end{aligned} \quad (22)$$

а затем, умножая обе части (22) на 2τ и суммируя по j' от 0 до j , получаем

$$\begin{aligned} & \|y^{j+1}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq M_6 \sum_{j'=0}^j \tau \sum_{\alpha=1}^p \|y^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + M_7 \left(\|y^0\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \right. \\ & \left. + \sum_{j'=0}^j \tau \sum_{\alpha=1}^p \left(\|\varphi^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{i_\beta \neq i_\alpha} (\mu_{-\alpha}^2 + \mu_{+\alpha}^2) H / \hbar_\alpha \right) \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Из (23) имеем

$$\begin{aligned} & \|y^{j+1}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq M_6 \sum_{j'=0}^j \tau \sum_{\alpha=1}^p \|y^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + M_7 F^j, \\ & F^j = \sum_{j'=0}^j \tau \sum_{\alpha=1}^p \left(\|\varphi^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{i_\beta \neq i_\alpha} (\mu_{-\alpha}^2 + \mu_{+\alpha}^2) H / \hbar_\alpha \right) + \|y^0\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Покажем, что имеет место неравенство $\max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq \nu_1 \sum_{j'=0}^{j-1} \tau \max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \nu_2 F^j$,

где ν_1, ν_2 – известные положительные постоянные.

Перепишем неравенство (21) в виде

$$\begin{aligned} & \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq \|y^{j+\frac{\alpha-1}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \tau M_5 \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \\ & + \tau \left(\|\varphi^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{i_\beta \neq i_\alpha} (\mu_{-\alpha}^2 + \mu_{+\alpha}^2) H / \hbar_\alpha \right). \end{aligned} \quad (25)$$

Просуммируем (25) по α' от 1 до α , тогда получим

$$\begin{aligned} & \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq \|y^j\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + 2\tau M_5 \sum_{\alpha'=1}^{\alpha} \|y^{j+\frac{\alpha'}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \\ & + \tau \sum_{\alpha'=1}^{\alpha} \left(\|\varphi^{j+\frac{\alpha'}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{i_\beta \neq i_{\alpha'}} (\mu_{-\alpha'}^2 + \mu_{+\alpha'}^2) H / \hbar_{\alpha'} \right) \leq \\ & \leq \|y^j\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + 2\tau M_5 \sum_{\alpha=1}^p \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \tau \sum_{\alpha=1}^p \left(\|\varphi^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{i_\beta \neq i_\alpha} (\mu_{-\alpha}^2 + \mu_{+\alpha}^2) H / \hbar_\alpha \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Не нарушая общности, можно считать, что $\max_{1 \leq \alpha' \leq p} \|y^{j+\frac{\alpha'}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 = \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2$, в противном случае (25) будем суммировать до такого α , при котором $\|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2$ достигает максимального значения при фиксированном j . Тогда (26) переписем в виде

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 &\leq \|y^j\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + 2\tau M_5 \max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \\ &+ \tau \sum_{\alpha=1}^p \left(\|\varphi^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{i_{\beta \neq i_{\alpha}}} (\mu_{-\alpha}^2 + \mu_{+\alpha}^2) H/\hbar_{\alpha} \right). \end{aligned} \quad (27)$$

Так как из (24) следует, что

$$\|y^j\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq M_6 \sum_{j'=0}^{j-1} \tau \max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + M_7 F^j, \quad (28)$$

то из (27) с учетом (28) имеем

$$(1 - 2\tau M_5) \max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq M_6 \sum_{j'=0}^{j-1} \tau \max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + M_8 F^j.$$

Выбирая $\tau \leq \tau_0 = \frac{1}{4pM_5}$, из последнего находим

$$\max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 \leq \nu_1 \sum_{j'=0}^{j-1} \tau \max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \nu_2 F^j.$$

Введя обозначение $g_{j+1} = \max_{1 \leq \alpha \leq p} \|y^{j+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2$, последнее соотношение можно переписать в виде

$$g_{j+1} \leq \nu_1 \sum_{k=1}^j \tau g_k + \nu_2 F^j. \quad (29)$$

Применяя к (29) лемму 4 [17, стр. 171], получаем априорную оценку

$$\begin{aligned} \|y^{j+1}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 &\leq M [\|y^0\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \sum_{j'=0}^j \tau \sum_{\alpha=1}^p \|\varphi^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \\ &+ \sum_{j'=0}^j \tau \sum_{\alpha=1}^p \sum_{i_{\beta \neq i_{\alpha}}} (\mu_{-\alpha}^2(0, x', t_{j'}) + \mu_{+\alpha}^2(l_{\alpha}, x', t_{j'})) H/\hbar_{\alpha}], \end{aligned} \quad (30)$$

где $M = const > 0$ не зависит от \hbar_{α} и τ ; $x' = (x_1, x_2, \dots, x_{\alpha-1}, x_{\alpha+1}, \dots, x_p)$.

Итак, справедлива следующая

Теорема 1. Локально-одномерная схема (10)–(12) устойчива по начальным данным и правой части, так что для решения задачи (10)–(12) при $\tau \leq \tau_0$ справедлива оценка (30).

Сходимость локально-одномерной схемы

По аналогии с [15, с. 528] представим решение задачи (14) в виде суммы $z_{(\alpha)} = v_{(\alpha)} + \eta_{(\alpha)}$, $z_{(\alpha)} = z^{j+\frac{\alpha}{p}}$, где $\eta_{(\alpha)}$ определяется условиями

$$\frac{\eta_{(\alpha)} - \eta_{(\alpha-1)}}{\tau} = \psi_{\alpha}, \quad x \in \omega_{h_{\alpha}} + \gamma_{h_{\alpha}}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, p, \quad (31)$$

$$\eta(x, 0) = 0, \quad \psi_{\alpha} = \begin{cases} \psi_{\alpha}, & x_{\alpha} \in \omega_{h_{\alpha}}, \\ \psi_{-\alpha}, & x_{\alpha} = 0, \\ \psi_{+\alpha}, & x_{\alpha} = l_{\alpha}. \end{cases}$$

Из (31) следует $\eta^{j+1} = \eta_{(p)} = \eta^j + \tau(\psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_p) = \eta^j = \dots = \eta^0 = 0$, так как $\eta^0 = 0$. Тогда для $\eta_{(\alpha)}$ имеем $\eta_{(\alpha)} = \tau(\psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{\alpha}) = -\tau(\psi_{\alpha+1} + \dots + \psi_p) = O(\tau)$.

Функция $v_{(\alpha)}$ определяется условиями:

$$\frac{v_{(\alpha)} - v_{(\alpha-1)}}{\tau} = \tilde{\Lambda}_{\alpha} v_{(\alpha)} + \tilde{\psi}_{\alpha}, \quad \tilde{\psi}_{\alpha} = \tilde{\Lambda}_{\alpha} \eta_{(\alpha)} + \psi_{\alpha}^*, \quad x \in \omega_{h_{\alpha}}, \quad (32)$$

$$0,5h_{\alpha} \frac{v_{(\alpha)} - v_{(\alpha-1)}}{\tau} = \Lambda_{\alpha}^{-} v_{(\alpha)} + \tilde{\psi}_{-\alpha}, \quad \tilde{\psi}_{-\alpha} = \Lambda_{\alpha}^{-} \eta_{(\alpha)} + \psi_{-\alpha}^*, \quad x_{\alpha} = 0, \quad (33)$$

$$0,5h_{\alpha} \frac{v_{(\alpha)} - v_{(\alpha-1)}}{\tau} = \Lambda_{\alpha}^{+} v_{(\alpha)} + \tilde{\psi}_{+\alpha}, \quad \tilde{\psi}_{+\alpha} = \Lambda_{\alpha}^{+} \eta_{(\alpha)} + \psi_{+\alpha}^*, \quad x_{\alpha} = l_{\alpha}, \quad (34)$$

$$v(x, 0) = 0. \quad (35)$$

Если существуют непрерывные в замкнутой области \bar{Q}_T производные $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \frac{\partial^4 u}{\partial x_{\alpha}^2 \partial x_{\beta}^2}, \frac{\partial^3 u}{\partial x_{\alpha}^2 \partial t}, \frac{\partial^3 k_{\alpha}}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}^2}, \frac{\partial^2 k_{\alpha}}{\partial x_{\alpha} \partial t}, \frac{\partial^2 r_{\alpha}}{\partial x_{\beta}^2}, \frac{\partial r_{\alpha}}{\partial t}, \frac{\partial^2 q_{\alpha}}{\partial x_{\beta}^2}, \frac{\partial q_{\alpha}}{\partial t}, \frac{\partial^2 \rho_{\alpha}}{\partial x_{\alpha}^2}, \frac{\partial \rho_{\alpha}}{\partial t}, \frac{\partial^2 f}{\partial x_{\beta}^2}, \frac{\partial f}{\partial t}$, $1 \leq \alpha, \beta \leq p$, $\alpha \neq \beta$, то $\tilde{\Lambda}_{\alpha} \eta_{(\alpha)} = -\tau \tilde{\Lambda}_{\alpha} (\psi_{\alpha+1} + \dots + \psi_p) = O(\tau)$, $\Lambda_{\alpha}^{\pm} \eta_{(\alpha)} = O(\tau)$.

Решение задачи (32)–(35) оценим с помощью теоремы 1.

$$\begin{aligned} \|v^{j+1}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 &\leq M(T) [\sum_{j'=0}^j \tau \sum_{\alpha=1}^p \|\tilde{\psi}_{\alpha}^{j'+\frac{\alpha}{p}}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)}^2 + \\ &+ \sum_{j'=0}^j \tau \sum_{\alpha=1}^p \sum_{i_{\beta \neq i_{\alpha}}} (\tilde{\psi}_{-\alpha}^2(0, x', t_{j'}) + \tilde{\psi}_{+\alpha}^2(l_{\alpha}, x', t_{j'})) H/\hbar_{\alpha}. \end{aligned} \quad (36)$$

Так как $\eta^j = 0$, $\eta_{(\alpha)} = O(\tau)$, $\|z^j\| \leq \|v^j\|$, из оценки (36) следует

Теорема 2. Пусть задача (1)–(3) имеет единственное непрерывное в \bar{Q}_T решение $u(x, t)$ и существуют непрерывные в \bar{Q}_T производные $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \frac{\partial^4 u}{\partial x_\alpha^2 \partial x_\beta^2}, \frac{\partial^3 u}{\partial x_\alpha^2 \partial t}, \frac{\partial^3 k_\alpha}{\partial x_\alpha \partial x_\beta^2}, \frac{\partial^2 k_\alpha}{\partial x_\alpha \partial t}, \frac{\partial^2 r_\alpha}{\partial x_\beta^2}, \frac{\partial r_\alpha}{\partial t}, \frac{\partial^2 q_\alpha}{\partial x_\beta^2}, \frac{\partial q_\alpha}{\partial t}, \frac{\partial^2 \rho_\alpha}{\partial x_\alpha^2}, \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial t}, \frac{\partial^2 f}{\partial x_\beta^2}, \frac{\partial f}{\partial t}, 1 \leq \alpha, \beta \leq p, \alpha \neq \beta$, тогда локально-одномерная схема (10)–(12) сходится к решению дифференциальной задачи (1)–(3) со скоростью $O(|h|^2 + \tau)$, так что при достаточно малом τ имеет место оценка

$$\|y^{j+1} - u^{j+1}\|_{L_2(\bar{\omega}_h)} \leq M(|h|^2 + \tau), \quad 0 < \tau \leq \tau_0, \text{ где } |h|^2 = h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_p^2.$$

Тестовая задача и численные результаты

Коэффициенты уравнения и граничных условий исходной дифференциальной задачи (1)–(3) подбираются таким образом, чтобы точным решением при $p = 2$ была функция $u(x, t) = t^3(x_1^4 + x_2^4)$.

Ниже в таблице при уменьшении размера сетки приведены максимальное значение погрешности ($z = y - u$) и вычислительный порядок сходимости (ПС) в нормах $\|\cdot\|_{L_2(\bar{\omega}_{h\tau})}$ и $\|\cdot\|_{C(\bar{\omega}_{h\tau})}$, где $\|y\|_{C(\bar{\omega}_{h\tau})} = \max_{(x_i, t_j) \in \bar{\omega}_{h\tau}} |y|$, когда $\bar{h} = h_1 = h_2 = \sqrt{\tau}$. Погрешность уменьшается в соответствии с порядком аппроксимации $O(h^2 + (\sqrt{\tau})^2)$. Вычислительный порядок сходимости определяется по следующей формуле: $\text{ВПС} = \log_{\frac{\bar{h}_1}{\bar{h}_2}} \frac{\|z_1\|}{\|z_2\|} = \log_2 \frac{\|z_1\|}{\|z_2\|}$, где z_i – это погрешность, соответствующая \bar{h}_i .

Изменение погрешности в нормах $\|\cdot\|_{L_2(\bar{\omega}_{h\tau})}$ и $\|\cdot\|_{C(\bar{\omega}_{h\tau})}$ при уменьшении размера сетки, когда $\bar{h} = h_1 = h_2 = \sqrt{\tau}$ / Change in the error in the norms $\|\cdot\|_{L_2(\bar{\omega}_{h\tau})}$ and $\|\cdot\|_{C(\bar{\omega}_{h\tau})}$ with decreasing grid size, when $\bar{h} = h_1 = h_2 = \sqrt{\tau}$

\bar{h}	$\max_{0 < j < m} \ z^j\ _{L_2(\bar{\omega}_{h\tau})}$	ВПС в $\ \cdot\ _{L_2(\bar{\omega}_{h\tau})}$	$\ z\ _{C(\bar{\omega}_{h\tau})}$	ВПС в $\ \cdot\ _{C(\bar{\omega}_{h\tau})}$
1/10	1,934821933e-1		6,228274668e-1	
1/20	7,203223443e-2	1,425486234	1,709484326e-1	1,865271373
1/40	1,8209049049e-2	1,983987076	4,375086560e-2	1,966177729
1/80	4,518370384e-3	2,010781138	1,085730492e-2	2,010645529
1/160	1,106091456e-3	2,030331858	2,630157765e-3	2,045444786
1/320	2,715281849e-4	2,026296814	6,130428447e-4	2,101089528

Заключение

В работе рассматривается многомерное (по пространственным переменным) интегро-дифференциальное уравнение конвекции-диффузии с переменными коэффициентами и граничными условиями третьего рода. Для численного решения поставленной многомерной задачи построена эффективная в плане экономичности, устойчивости и сходимости ЛОРС с порядком аппроксимации $O(|h|^2 + \tau)$. С помощью метода энергетических неравенств получены априорные оценки решения в L_2 -норме, откуда следуют единственность и устойчивость решения, а также сходимость решения ЛОРС к решению исходной дифференциальной задачи в L_2 -норме со скоростью, равной порядку аппроксимации разностной схемы. Проведены численные расчеты на тестовом примере, иллюстрирующие полученные в данной работе теоретические выкладки.

Список источников

1. Douglas J., Rachford H.H. On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables // Trans. Amer. Math. Soc. 1956. Vol. 82, № 2. P. 421–439.

2. Peaceman D.W., Rachford H.H. The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations // *J. Industr. Math. Soc.* 1955. Vol. 3, № 1. P. 28–41.
3. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1967. 196 с.
4. Самарский А.А. Однородные разностные схемы на неравномерных сетках для уравнений параболического типа // *Журн. вычисл. математики и мат. физики.* 1963. Т. 3, № 2. С. 266–298.
5. Самарский А.А. Об одном экономичном разностном методе решения многомерного параболического уравнения в произвольной области // *Журн. вычисл. математики и мат. физики.* 1962. Т. 2, № 5. С. 787–811.
6. Самарский А.А. Локально-одномерные разностные схемы для многомерных уравнений гиперболического типа произвольной области // *Журн. вычисл. математики и мат. физики.* 1964. Т. 4, № 4. С. 638–643.
7. Марчук Г.И. Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 264 с.
8. Дьяконов Е.Г. Разностные схемы с расщепляющимся оператором для нестационарных уравнений // *Докл. АН СССР.* 1962. Т. 144, № 1. С. 29–32.
9. Дьяконов Е.Г. Разностные схемы с расщепляющимся оператором для многомерных нестационарных задач // *Журн. вычисл. математики и мат. физики.* 1962. Т. 2, № 4. С. 549–568.
10. Абрашин В.Н., Асмолик В.А. Локально-одномерные разностные схемы для многомерных квазилинейных гиперболических уравнений // *Диф. уравнения.* 1982. Т. 18, № 7. С. 1107–1117.
11. Фрязинов И.В. О разностной аппроксимации граничных условий для третьей краевой задачи // *Журн. вычисл. математики и мат. физики.* 1964. Т. 4, № 6. С. 1106–1112.
12. Фрязинов И.В. Экономичные схемы для уравнения теплопроводности с краевым условием III рода // *Журн. вычисл. математики и мат. физики.* 1972. Т. 12, № 3. С. 612–626.
13. Бештокова З.В., Лафишева М.М., Шхануков-Лафишев М.Х. Локально-одномерные разностные схемы для параболических уравнений в средах, обладающих «памятью» // *Журн. вычисл. математики и мат. физики.* 2018. Т. 58, № 9. С. 1531–1542.
14. Бештокова З.В. Локально-одномерная разностная схема для решения одной нелокальной краевой задачи для параболического уравнения в многомерной области // *Диф. уравнения.* 2020. Т. 56, № 3. С. 366–379.
15. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 614 с.
16. Андреев В.Б. О сходимости разностных схем, аппроксимирующих вторую и третью краевые задачи для эллиптических уравнений // *Журн. вычисл. математики и мат. физики.* 1968. Т. 8, № 6. С. 1218–1231.
17. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 415 с.

References

1. Douglas J., Rachford H.H. On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables. *Trans. Amer. Math. Soc.* 1956;82(2):421-439.
2. Peaceman D.W., Rachford H.H. The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. *J. Industr. Math. Soc.* 1955;3(1):28-41.
3. Yanenko N.N. *Method of fractional steps for solving multidimensional problems of mathematical physics.* Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch; 1967. 196 p. (In Russ.).
4. Samarskii A.A. Homogeneous difference schemes on non-uniform nets for equations of parabolic type. *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 1963;3(2):351-393.
5. Samarskii A.A. On an economical difference method for the solution of a multidimensional parabolic equation in an arbitrary region. *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 1963;2(5):894-926.
6. Samarskii A.A. Local one-dimensional difference schemes for multi-dimensional hyperbolic equations in an arbitrary region. *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 1964;4(4):21-35.
7. Marchuk G.I. *Splitting methods.* Moscow: Nauka Publ.; 1988. 264 p. (In Russ.).
8. D'yakonov E.G. Difference schemes with a splitting operator for nonstationary equations. *Dokl. Akademii nauk SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences.* 1962;144(1):29-32. (In Russ.).
9. D'yakonov E.G. Difference schemes with splitting operator for multidimensional nonstationary problems. *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 1963;2(4):581-607.
10. Abrashin V.N., Asmolik V.A. Locally one-dimensional difference schemes for multidimensional quasilinear hyperbolic equations. *Diff. uravneniya = Differential Equations.* 1982;18(7):1107-1117. (In Russ.).
11. Fryazinov I.V. Difference approximation of the boundary conditions for the third boundary value problem. *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 1964;4(6):180-188.
12. Fryazinov I.V. Economical schemes for the heat equation with a boundary condition of the third kind. *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 1972;12(3):612-626.

13. Beshtokova Z.V., Lafisheva M.M., Shkhanukov-Lafishev M.Kh. Locally one-dimensional difference schemes for parabolic equations in media possessing memory. *Comput. Math. Math. Phys.* 2018;58(9):1477-1488.
14. Beshtokova Z.V. Locally one-dimensional difference scheme for a nonlocal boundary value problem for a parabolic equation in a multidimensional domain. *Differential Equations.* 2020;56(3):354-368.
15. Samarskiy A.A. *Theory of difference schemes.* Moscow: Nauka Publ.; 1989. 614 p. (In Russ.).
16. Andreev V.B. The convergence of difference schemes which approximate the second and third boundary value problems for elliptic equations. *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 1968;8(6):44-62.
17. Samarskii A.A., Gulin A.V. *Stability of difference schemes.* Moscow: Nauka Publ.; 1973. 415 p. (In Russ.).

Информация об авторе

З.В. Бештокова – младший научный сотрудник, отдел вычислительных методов.

Information about the author

Z.V. Beshtokova – Junior Researcher, Department of Computational Methods.

Статья поступила в редакцию 27.02.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 27.02.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 16.05.2022.

Научная статья

УДК 519.2

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-15-20

МЕТОД ДИХОТОМИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И ОПТИМАЛЬНЫЙ ПОРТФЕЛЬ

Наталья Викторовна Данилова^{1✉}, Даниил Игоревич Житников²

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

¹nvdanilova@sfedu.ru✉

²zhitnikov@sfedu.ru

Аннотация. Рассматривается проблема нахождения оптимального портфеля. Решению данной проблемы в различных её постановках посвящено много статей, что говорит об её актуальности. Для решения задачи в статье применяются методы робастной оптимизации и машинного обучения, а именно производится разбиение выборки случайных доходностей активов на кластеры с последующим построением эллипсоида в каждом кластере. В качестве алгоритма кластеризации используется дихотомический метод максимального правдоподобия. Для построения эллипсоида используются выборочный средний вектор и выборочная ковариационная матрица; радиус рассчитывается исходя из предположения, что элементы выборки имеют нормальный закон распределения. Приводится пример расчёта оптимального портфеля, использующий реальные значения векторов возврата. При этом часть выборки используется для нахождения выборочных средних и выборочных ковариационных матриц кластеров, оставшаяся часть выборки используется для верификации портфеля. В таблицах отражена зависимость возврата оптимального портфеля от параметров модели и от числа кластеров (эллипсоидов). Произведено сравнение результатов; отмечены случаи, в которых происходит прирост дохода инвестора.

Ключевые слова: оптимальный портфель, доходность, робастная оптимизация, машинное обучение, решающее правило, метод максимального правдоподобия, дихотомическая кластеризация

Для цитирования: Данилова Н.В., Житников Д.И. Метод дихотомической кластеризации и оптимальный портфель // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 15–20.

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

Original article

DICHOTOMOUS CLUSTERING METHOD AND OPTIMAL PORTFOLIO

Natalia V. Danilova^{1✉}, Daniil I. Zhitnikov²

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

¹nvdanilova@sfedu.ru✉

²zhitnikov@sfedu.ru

Abstract. The problem of optimal portfolio finding is considered in the paper. Many papers are devoted to the solving of this problem in various its formulations, that is why the problem is relevant. For the solving of the problem the methods of robust optimization and machine learning are used, namely, the splitting of the sample of the random asset returns into clusters and subsequent construction of an ellipsoid in each cluster. The method of maximal likelihood is used for dividing on two clusters, the method of dichotomous clustering is used for dividing on several clusters. The sample average and the sample covariance matrix are used for the constructing of the ellipsoid; the radius is calculated based on the assumption that the sample elements have a normal distribution. The example of calculating the optimal portfolio is given. It uses the real values of the return vectors. In this case part of the sample is used to calculate the sample means and the sample covariance matrices of the clusters, the rest part of the sample is used for verification of the portfolio. The tables show the dependence of the optimal

© Данилова Н.В., Житников Д.И., 2022

portfolio return on the model parameter and on the number of clusters (ellipsoids). The comparing of results is considered; there are cases in which there is an increase in the income of the investor.

Keywords: optimal portfolio, profitability, robust optimization, machine learning, decision rule, maximum likelihood method, dichotomous clustering

For citation: Danilova N.V., Zhitnikov D.I. Dichotomous Clustering Method and Optimal Portfolio. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(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 нахождения оптимального портфеля является актуальной, начиная с публикации в 1952 г. работы Марковитца [1] и до настоящего времени. Задача заключается в выборе оптимального вектора (портфеля) $x = (x_i)_{i=1}^n$, $\sum_{i=1}^n x_i = 1$, $i = 1, \dots, n$. Подробный анализ работ по оптимальному портфелю можно найти в [2, 3]. В интерпретации Марковитца качество портфеля определяется двумя параметрами – возвратом и риском. Возврат портфеля x вычисляется как среднее $E(R, x) = (\bar{R}, x)$, где R – вектор случайных возвратов активов, входящих в портфель; $\bar{R} = ER$; риск – это дисперсия: $D(R, x) = (Cx, x)$; C – ковариационная матрица: $C = ERR^T - \bar{R}\bar{R}^T$. Здесь (\cdot, \cdot) – скалярное произведение. Кроме дисперсии в качестве показателя, оценивающего риск, могут быть использованы и другие функционалы [4–6]. Портфель следует выбирать таким образом, чтобы возврат был как можно больше, а риск как можно меньше. По своей структуре задача об оптимальном портфеле относится к задачам с векторным критерием. Под её решением обычно понимается множество неулучшаемых стратегий – множество Парето. Один из вариантов вычисления парето-оптимальных портфелей заключается в скаляризации векторного критерия:

$$\max \left[(\bar{R}, x) - \lambda \sqrt{(Cx, x)} \right], \sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (1)$$

В целевую функцию входит параметр λ с заранее определенным множеством значений. Проблема заключается в том, что вероятностная мера P , по которой вычисляются среднее значение и дисперсия, неизвестна. Вместо неизвестной меры мы можем использовать обучающую выборку $V = \langle R_1, R_2, \dots, R_N \rangle$, на основе которой можно сформировать представление о вероятностной мере. Для эмпирической меры \bar{R} – выборочное среднее; C – выборочная ковариационная матрица. Подстановка \bar{R} и C в (1) позволяет найти решение, зависящее от выборки. Это решение не является устойчивым по отношению к изменению выборки [7–10]. В [11] рассматривается робастная постановка задачи об оптимальном портфеле как один из способов получения устойчивого решающего правила, а именно находится множество возможных значений выборочных средних – $\langle \bar{R}_1, \dots, \bar{R}_K \rangle$ и соответствующее множество значений выборочных ковариационных матриц – $\langle C_1, \dots, C_K \rangle$. Данный приём широко распространён в машинном обучении. Каждое из значений, входящих в эти множества, вычислено для соответствующей подвыборки $V_j = \langle R_{j_1}, \dots, R_{j_L} \rangle \subset V$. Основная идея заключается в том, что несколько наборов средних и ковариационных матриц будут характеризовать выборку лучше, чем один набор. Задача (1) трансформируется в задачу

$$\max_x \min_i \left[(x, \bar{R}_i) - \lambda \sqrt{(C_i x, x)} \right], \sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (2)$$

Для получения множества значений выборочных средних и множества значений выборочных ковариационных матриц предлагается разбиение выборки на кластеры. В качестве алгоритма разбиения выборки на два кластера – алгоритм максимального правдоподобия [12], на K кластеров – дихотомический алгоритм [13]. Приложения робастной оптимизации к задачам финансовой математики можно найти в работах [14, 15].

В данной статье рассматривается следующая постановка задачи об оптимальном портфеле:

$$\max_x \min_i \min_{R \in EL_i} (x, R), \sum_{i=1}^n x_i = 1, \quad EL_i = \{R : (M_i^{-1}(R - m_i), R - m_i) \leq r_i\}. \quad (3)$$

При этом предполагается, что $P(R \in EL_i) \geq \eta$. В задаче (3) EL_i – эллипсоид; M_i – симметричная матрица. Смысл задачи заключается в том, чтобы получить портфель с гарантированной доходностью при заданной доверительной вероятности.

Рассмотрим внутреннюю задачу

$$\min_{R \in EL_i} [(x, R)]. \quad (4)$$

Функция Лагранжа для задачи (4) имеет вид $L(R, \lambda) = (x, R) + \lambda (M_i^{-1}(R - m_i), R - m_i)$. Условия оптимальности и дополняющей нежесткости:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial R} = x + 2\lambda M_i^{-1}(R - m_i) = 0 \\ \lambda ((M_i^{-1}(R - m_i), R - m_i) - r_i) = 0 \end{cases}.$$

Поскольку $x \neq 0$, то $(M_i^{-1}(R - m_i), R - m_i) - r_i = 0$. Отсюда оптимальное значение $R_i^* = m_i - \sqrt{\frac{r_i}{(M_i x, x)}} M_i x$. Задача заключается в вычислении $\max_x \min_i ((x, m_i) - \sqrt{r_i(x, M_i x)})$ при ограничении $(I, x) = 1$. Здесь $M_i = C_i$; $m_i = \bar{R}_i$; r_i находится из равенства $\chi^2(n, r_i) = \eta$. Чтобы решить эту задачу, применим метод проекции субградиента.

Субградиент $G(x) = m_j - \frac{\sqrt{r_j} M_j x}{(M_j x, x)^{3/2}}$, $j = \arg \min_i ((x, m_i) - \sqrt{r_i(x, M_i x)})$, оператор проектирования $\Pi(y) = y + \frac{1 - (I, y)}{(I, I)} I$.

Экспериментальная часть

Целью является сравнение портфеля Марковитца с новым методом вычисления оптимального портфеля при различном числе кластеров и различных коэффициентах λ в задаче (2).

Для расчётов используется выборка доходностей ПАО «АЛРОСА», ПАО «Русолово» и ПАО «ИСКЧ» за период с 27.06.2014 по 19.03.2021 объёмом 2000, которая разбивается на две выборки объёмами 1500 и 500 соответственно. Первая часть выборки (V_1) используется для вычисления портфеля x , вторая (V_2) – выборочного среднего доходности портфеля $\bar{V} = \frac{1}{|V_2|} \sum_{R \in V_2} (x, R)$, выбо-

рочной дисперсии доходности портфеля $D = \frac{1}{|V_2|} \sum_{R \in V_2} (x, R)^2 - \bar{V}^2$ и минимальной доходности портфеля $V_{\min} = \min_{x \in V_k} (x, R)$.

Таблица 1 посвящена методу Марковитца. В её втором столбце приведены оптимальные портфели. Содержание столбца демонстрирует изменчивость портфелей в зависимости от условий их формирования. Средняя доходность ниже единицы, за исключением средней доходности, полученной для четырех кластеров и $\lambda = 0,5$. Столбец, посвященный риску, демонстрирует естественное снижение риска с ростом λ для разных кластерных структур. Таковую же естественную тенденцию демонстрирует столбец с минимальной доходностью, а именно минимальная доходность увеличивается с ростом λ для разного числа кластеров.

Таблица 1 / Table 1

Зависимость выборочного среднего доходности, выборочной дисперсии доходности и минимальной доходности от количества кластеров (K) / Dependence the average, the volatility and the minimal value of the return of the optimal portfolio on the number of clusters (K)

Количество кластеров	Значения $x_1; x_2; x_3$	Средняя доходность	Риск	Минимальная доходность	λ
$K=1$	-1; 1; 1	0,982	0,042	0,327	0
	0,481; 0,094; 0,425	0,999	0,009	0,700	0,5
	0,526; 0,092; 0,382	0,999	0,008	0,730	1
$K=2$	0,007; -0,007; 1	0,996	0,011	0,309	0
	0,154; 0,212; 0,635	0,995	0,008	0,561	0,5
	0,208; 0,263; 0,529	0,995	0,006	0,633	1
$K=3$	0,007; -0,007; 1	0,996	0,008	0,309	0
	0,698; 1; -0,698	0,994	0,005	0,476	0,5
	0,517; 1; -0,517	0,993	0,002	0,553	1
$K=4$	0,007; -0,007; 1	0,996	0,007	0,309	0
	0,645; -0,645; 1	1,005	0,003	0,298	0,5
	0,517; 1; -0,517	0,993	0,002	0,553	1

Выборочное среднее значение доходности, выборочная дисперсия доходности и минимальное значение доходности оптимального портфеля в зависимости от количества эллипсоидов (кластеров), построенных в предположении, что элементы выборки имеют нормальный закон распределения (доверительная вероятность $\eta = 0,95$), рассчитанные по предлагаемому методу, отражены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты вычисления оптимального портфеля по предлагаемому методу / The results of calculating the optimal portfolio by the proposed method

Количество кластеров	Значения $x_1; x_2; x_3$	Средняя доходность	Риск	Минимальная доходность
$K=1$	0,555; 0,092; 0,354	0,999	0,008	0,749
$K=2$	0,275; 0,256; 0,469	0,996	0,011	0,674
$K=3$	0,821; -0,085; 0,264	1,002	0,005	0,807
$K=4$	1; 0,048; -0,048	1,003	0,000	0,903

Из табл. 2 видно, что при $K = 3$ и $K = 4$ средняя доходность больше 1 и равна 1,002 и 1,003 соответственно. То есть в этом случае произойдет получение прибыли в размере $0,002X_0$ и $0,003X_0$, где X_0 – начальный капитал инвестора. Особенно интересна последняя строка таблицы – средняя доходность больше единицы, средний риск близок к нулю и минимальная доходность близка к единице.

Заключение

В статье рассматривается робастная постановка задачи об оптимальном портфеле. Приводится её решение, использующее алгоритм дихотомической кластеризации. Рассмотрен вычислительный пример расчёта доходности оптимального портфеля для реальных данных. Результаты демонстрируют очевидное преимущество нового метода по сравнению с методом, изложенным в [11]. Однако для формирования окончательного вывода требуется больше экспериментов. Еще одно важное преимущество – в новом методе отсутствует параметр λ – это упрощает задачу выбора оптимального портфеля, превращая ее из задачи с векторным критерием в задачу со скалярным критерием.

Список источников

1. Markowitz H. Portfolio selection // *J. Financ.* 1952. Vol. 7, № 1. P. 77–91.
2. Brandt M. Portfolio choice problems // *Handbook Financ. Economet.* 2009. № 1. P. 269–336.
3. Steinbach M.C. Markowitz revisited: mean-variance models in financial portfolio analysis // *SIAM Rev.* 2001. Vol. 43, № 1. P. 31–85.
4. Konno H., Yamazaki H. Mean-absolute deviation portfolio optimization model and its applications to Tokyo stock market // *Manag. Sci.* 1991. Vol. 37, № 5. P. 519–531.
5. Basak S., Shapiro A. Value-at-risk-based risk management: optimal policies and asset prices // *Rev. Financ. Stud.* 2001. Vol. 14, № 2. P. 371–405.
6. Rockafellar R.T., Uryasev S. Optimization of conditional value-at-risk // *J. Risk.* 2000. № 2. P. 21–42.
7. Fabozzi F.J., Huang D., Zhou G. Robust portfolios: contributions from operations research and finance // *Ann. Oper. Res.* 2010. Vol. 176, № 1. P. 191–220.
8. Pflug Pohl. A Review on Ambiguity in Stochastic Portfolio Optimization // *Set-Valued Var. Anal.* 2018. № 26. P. 733–757.
9. Wozabal D. A framework for optimization under ambiguity // *Ann. Oper. Res.* 2002. Vol. 193, № 1. P. 21–47.
10. Pflug G.C., Wozabal D. Ambiguity in portfolio selection // *Quant. Finan.* 2007. Vol. 7, № 4. P. 435–442.
11. Белявский Г.И., Данилова Н.В., Логунов А.Д. Обучение без учителя и робастная оптимизация в задаче о портфеле // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки.* 2020. № 4. С. 4–9.
12. Шлезингер М., Главач В. Десять лекций по структурному и статистическому распознаванию образов. Киев : Наукова думка, 2004. 546 с.
13. Rokach L., Maimon O. Clustering methods // *Data mining and knowledge discovery handbook.* Springer US, 2005. P. 321–352.
14. Ben-Tal A., Ghaoui L.E., Nemirovski A. Robust Optimization. Princeton; Oxford: Princeton University Press, 2009. P. 542.
15. Bandi Ch., Bertsimas D. Robust option pricing // *European J. of Operational Research.* 2014. Vol. 239. P. 842–853.

References

1. Markowitz H. Portfolio selection. *J. Financ.* 1952;7(1):77-91.
2. Brandt M. Portfolio choice problems. *Handbook Financ. Economet.* 2009;(1):269-336.
3. Steinbach M.C. Markowitz revisited: mean-variance models in financial portfolio analysis. *SIAM Rev.* 2001;43(1):31-85.
4. Konno H., Yamazaki H. Mean-absolute deviation portfolio optimization model and its applications to Tokyo stock market. *Manag. Sci.* 1991;37(5):519-531.
5. Basak S., Shapiro A. Value-at-risk-based risk management: optimal policies and asset prices. *Rev. Financ. Stud.* 2001;14(2):371-405.
6. Rockafellar R.T., Uryasev S. Optimization of conditional value-at-risk. *J. Risk.* 2000;(2):21-42.
7. Fabozzi F.J., Huang D., Zhou G. Robust portfolios: contributions from operations research and finance. *Ann. Oper. Res.* 2010;176(1):191-220.
8. Pflug Pohl. A Review on Ambiguity in Stochastic Portfolio Optimization. *Set-Valued Var. Anal.* 2018;(26):733-757.
9. Wozabal D. A framework for optimization under ambiguity. *Ann. Oper. Res.* 2002;193(1):21-47.
10. Pflug G.C., Wozabal D. Ambiguity in portfolio selection. *Quant. Finan.* 2007;7(4):435-442.
11. Belyavsky G.I., Danilova N.V., Logunov A.D. Unsupervised learning and robust optimization in the portfolio problem. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences.* 2020;(4):4-9. (In Russ.).
12. Schlesinger M., Glavach V. *Ten lectures on structural and statistical pattern recognition.* Kyiv: Naukova dumka Publ.; 2004. 546 p. (In Russ.).
13. Rokach L., Maimon O. Clustering methods. *Data mining and knowledge discovery handbook.* Springer US; 2005:321-352.
14. Ben-Tal A., Ghaoui L.E., Nemirovski A. Robust Optimization. Princeton; Oxford: Princeton University Press; 2009:542.
15. Bandi Ch., Bertsimas D. Robust option pricing. *European Journal of Operational Research.* 2014;239:842-853.

Информация об авторах

Н.В. Данилова – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Д.И. Житников – студент, кафедра прикладной математики и программирования, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

N.V. Danilova – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Higher Mathematics and Operations Research, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

D.I. Zhitnikov – Student, Department of Applied Mathematics and Programming, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

*Статья поступила в редакцию 21.03.2022; одобрена после рецензирования 04.04.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 21.03.2022; approved after reviewing 04.04.2022; accepted for publication 16.05.2022.*

Научная статья
УДК 514.764.2
doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-21-27

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОДОЛЖЕНИЕ ЛОКАЛЬНО ОДНОРОДНОГО И НЕОДНОРОДНОГО РИМАНОВА МНОГООБРАЗИЯ

Владимир Александрович Попов

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

Аннотация Рассматривается алгебра Ли \mathfrak{g} всех векторных полей Киллинга риманова аналитического многообразия, ее стационарная подалгебра \mathfrak{h} , односвязная группа Ли G , соответствующая алгебре Ли \mathfrak{g} , и подгруппа H , соответствующая подалгебре Ли \mathfrak{h} . Множество левых смежных классов G/H образует однородное многообразие тогда и только тогда, когда H замкнута в G . Изучаются условия замкнутости H в G на основе свойств алгебры Ли \mathfrak{g} и ее подалгебры \mathfrak{h} .

Изучается также категория римановых аналитических многообразий, объектами которой являются ориентированные римановы аналитические многообразия, имеющие изометричные друг другу открытые подмножества U , следовательно, одну и ту же алгебру векторных полей Киллинга \mathfrak{g} . Предполагается, что алгебра \mathfrak{g} не имеет центра. Морфизмами данной категории являются сохраняющие ориентацию и векторные поля Киллинга локально изометрические отображения $f: M \rightarrow N$. Они определены на всем многообразии M , за исключением множества S коразмерности не менее двух, состоящего из неподвижных точек, сохраняющих ориентацию изометрий между открытыми подмножествами многообразия M . Эта категория имеет универсально притягивающий объект – так называемое квазиполное многообразие, которое по определению является непродолжаемым, не допускающим нетривиальных сохраняющих ориентацию и векторные поля Киллинга изометрий между своими открытыми подмножествами. Для произвольной римановой аналитической метрики определяется псевдополное риманово аналитическое многообразие – односвязное многообразие M , для которого не существует сохраняющего ориентацию локально изометрического отображения $f: M \rightarrow N$, где N – односвязное риманово аналитическое многообразие, отличное от M .

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

Для цитирования: Попов В.А. Аналитическое продолжение локально однородного и неоднородного риманова аналитического многообразия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 21–27.

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

Original article

ANALYTIC EXTENSION OF LOCALLY GIVEN RIEMANNIAN MANIFOLD TO GLOBAL SPACE

Vladimir A. Popov

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

Abstract. Let's consider the Lie algebra \mathfrak{g} of all Killing vector fields of a Riemannian analytic manifold, its stationary subalgebra \mathfrak{h} , the simply connected Lie group G corresponding to the Lie algebra \mathfrak{g} and the subgroup H corresponding to the Lie subalgebra \mathfrak{h} . The set of left adjacent classes G/H forms a homogeneous manifold if and only if H is closed in G . We study the properties of the Lie algebra \mathfrak{g} and its subalgebra \mathfrak{h} under which H is closed in G .

© Попов В.А., 2022

The following category of Riemannian analytic manifolds is also studied. The objects of this category are oriented Riemannian analytic manifolds having open subsets isometric to each other and, consequently, the same algebra \mathfrak{g} of Killing vector fields. It is assumed that the algebra \mathfrak{g} has no center. Morphisms of this category are locally isometric maps $f: M \rightarrow N$ preserving orientation and Killing vector fields. Moreover, the maps f are defined on the entire manifold M with the exception of the set S of codimension at least two, consisting of fixed points of orientation-preserving isometries between open subsets of the manifold M . This category has a universally attractive object. This is a so-called quasi-complete manifold, which by definition is unextendable manifold that does not admit nontrivial orientation-preserving and vector Killing fields isometries between its open subsets. For an arbitrary Riemannian analytic metric, a pseudo-field Riemannian analytic manifold is defined. This is a simply connected manifold M for which there is no locally isometric map $f: M \rightarrow N$ define on the whole M and preserving orientation and killing vector fields. Where N is a simply connected Riemannian analytic manifold other than M .

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

For citation: Popov V.A. Analytic Extension of Locally Given Riemannian Manifold to Global Space. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):21-27. (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

Топологическое пространство левых смежных классов G/H группы Ли G по ее подгруппе Ли H является многообразием тогда и только тогда, когда H замкнута в G . Однако H может быть не замкнута даже в случае односвязности группы G . Вопрос замкнутости подгруппы Ли H в односвязной группе Ли G тесно связан с продолжением локально заданной римановой аналитической метрики до метрики однородного риманова пространства, исходя из свойств алгебры Ли векторных полей Киллинга \mathfrak{g} и ее стационарной подалгебры \mathfrak{h} . Характеристика незамкнутых подгрупп Ли содержится в классической работе А.И. Мальцева [1]. Если подгруппа Ли H группы Ли G не является замкнутой в G , то группа H содержит однопараметрическую подгруппу γ , замыкание которой не содержится в H . Однако указанное свойство невозможно проверить исходя из свойств алгебр Ли \mathfrak{g} и \mathfrak{h} .

Известны следующие результаты по вопросу замкнутости подгруппы Ли H в группе Ли G , вытекающие из свойств их алгебр Ли \mathfrak{g} и \mathfrak{h} :

1. Пусть G односвязна. Если \mathfrak{h} является идеалом в \mathfrak{g} или полупроста, то H замкнута в G [2, 3].
2. Пусть G компактна. Если \mathfrak{h} полупроста, то H замкнута в G [3].
3. Пусть G разрешима и полупроста. Тогда H замкнута в G [3].
4. Пусть G полупроста и $\dim \mathfrak{g} - \dim \mathfrak{h} < 5$. Тогда H замкнута в G [3].

Исследуем вопрос о замкнутости подгруппы H в односвязной группе G в случае, когда алгебра \mathfrak{g} является алгеброй всех векторных полей Киллинга риманова аналитического многообразия. Он эквивалентен вопросу о возможности аналитического продолжения локально заданной метрики риманова локально однородного пространства до однородного пространства. Изучение аналитического продолжения произвольного локально заданного риманова аналитического многообразия связано с замкнутостью подгруппы H в G . Приведем достаточное условие замкнутости H в G , выраженное в виде свойств алгебры \mathfrak{g} и подалгебры \mathfrak{h} .

Для начала дадим некоторые определения и утверждения, касающиеся аналитического продолжения локально заданного риманова аналитического многообразия.

Определение 1. Аналитическим продолжением связного риманова аналитического многообразия M назовём связное риманово аналитическое многообразие N , такое что M аналитически вкладывается в N как собственное открытое подмножество. 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, называются локально изометричными.

Определение 3. Риманово аналитическое многообразие M называется локально однородным, если $\dim \mathfrak{g} - \dim \mathfrak{h} = \dim M$.

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 продолжаемо 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, 5].

Из леммы 1 следует, что все локально изометричные римановы аналитические многообразия имеют одну и ту же алгебру Ли векторных полей Киллинга. Таким образом, можно говорить об алгебре Ли векторных полей Киллинга локально заданной римановой аналитической метрики. Римановы аналитические многообразия, алгебра Ли векторных полей Киллинга которых не имеет центра, изучались в [4, 5].

Локально однородные римановы аналитические многообразия

Исследуем случай, когда алгебра \mathfrak{g} имеет ненулевой центр \mathfrak{z} . Укажем свойства алгебр \mathfrak{g} , \mathfrak{h} и \mathfrak{z} , обеспечивающие замкнутость подгруппы H в G .

Определим локальную группу локальных изометрий. Рассмотрим произвольное риманово аналитическое многообразие M , алгебру Ли \mathfrak{g} , состоящую из векторных полей Киллинга на нём, и группу Ли G с алгеброй Ли \mathfrak{g} . Под локальной группой (chunk of a group) будем подразумевать малую окрестность единицы группы $U \subset G$. Она состоит из локальных изометрий многообразия M . Рассмотрим нормальный шар $B_{2\delta}$ радиусом 2δ с центром в $p \in M$. Окрестность единицы U в группе G состоит из элементов $g \in G$, определяющих изометрии из шара B_δ радиусом δ с центром в отмеченной точке $p \in M$ в шар $B_{2\delta}$ радиусом 2δ с центром в $p \in M$. Отметим, что $H \subset U$. Алгебра Ли \mathfrak{g} , как правило, не порождает группы изометрий многообразия M , но порождает псевдогруппу U локальных изометрий. Орбита локальной группы локальных изометрий многообразия M является локально однородным многообразием N . Заметим также, что подгруппа H , порожденная стационарной подалгеброй \mathfrak{h} , образует группу изометрий шара B_δ с центром в отмеченной точке многообразия M .

Изучим сначала некоторые свойства локальной группы локальных изометрий с точки зрения абстрактных групп преобразований. Рассмотрим локальную группу $U \subset G$ как подгруппу группы локальных диффеоморфизмов многообразия M с отмеченной точкой p , $G \subset \text{Diff}M$. Назовем элемент $\tilde{n} \in G \subset \text{Diff}M$ умножением справа, если существует такой элемент $n \in G$, что для всех $x \in M$, $x = g(p)$, $\tilde{n}(x) = gn(p)$. Так как $\forall h \in H gh(p) = g(p) = x$, то $\tilde{n}(x) = gn(p) = ghn(p)$. Следовательно, $n(p) = hn(p) \Rightarrow p = n^{-1}hn(p) \Rightarrow n^{-1}hn \in H$. Таким образом, умножение справа на элемент n определено корректно, если $\forall h \in H \exists h_1 \in H$ такой, что для любой локальной изометрии $g \in G$ выполняется равенство $ghn = gn h_1$. Другими словами, n принадлежит нормализатору $N(H)$ группы H в G . Обозначим через N локальную группу, состоящую из элементов $n \in G$, умножение справа на которые в группе G порождает локальные изометрии многообразия M , через \mathfrak{n} – её алгебру Ли. Тогда $\mathfrak{h} \triangleleft \mathfrak{n} \subset \mathfrak{g}$. Заметим, что сами умножения справа, т.е. элементы \tilde{n} , а также элементы центра Z локальной группы G , принадлежат N . Обозначим через V орбиту отмеченной точки p локальной группы N на M . Присоединенное действие элементов $n \in N$, $g \mapsto n^{-1}gn$, задает локальные изометрии на V .

Рассмотрим отображение f из группы G , заданной как группа преобразований множества G в себя, определённое по формуле $f(g) = g(e) = ge$, где e – тождественная локальная изометрия. Так как $\tilde{n}(e) = \tilde{n}e = en = n$, будем считать, что $f(\tilde{n}) = n$. Строго говоря, $f(\tilde{n})$ – это класс смежности nH , но все элементы nh , $h \in H$, определяют одну и ту же локальную изометрию многообразия M . На множестве $f(G)$ определим умножение $g_1 g_2 = g_1(e)g_2(e)$. Так определённое умножение превращает $f(G)$ в подгруппу $G_0 \subset G$. Элементы $g \in G_0$ назовем левыми умножениями. Они дополняются правыми умножениями \tilde{n} , т.е. любой элемент $g \in G \subset \text{Diff}G$, $g(x) = gx \forall x \in G$ представим в виде $g = g_0 \tilde{n}$, $g_0 \tilde{n}(x) = g_0 x n \forall x \in G$. Так как элементы n , hn и nh , $n \in N$, $h \in H$, определяют с помощью умножений справа в группе G одну и ту же локальную изометрию на M , то группа умножений справа отождествляется с фактор-группой $\tilde{N} = N/H$,

а алгебра Ли этой группы отождествляется с фактор-алгеброй $\mathfrak{n}/\mathfrak{h}$. Следовательно, $G = G_0\tilde{N}$, $\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_0 + \tilde{\mathfrak{n}}$.

Рассмотрим $V \subset B_{2\delta}$ – орбиту отмеченной точки p группы локальных изометрий \tilde{N} . Группа левых умножений $N \subset G_0$ (точнее, её окрестность единицы) действует на V , причем элементы n , hn и nh , $n \in N$, $h \in H$, определяют с помощью умножений слева в группе N одну и ту же локальную изометрию на V . Тогда группа умножений слева в группе N также отождествляется с фактор-группой $\tilde{N} = N/H$, а алгебра Ли $\tilde{\mathfrak{n}}$ этой группы отождествляется с фактор-алгеброй $\mathfrak{n}/\mathfrak{h}$.

Таким образом, внутренние автоморфизмы группы \tilde{N} являются изометриями V . Они порождают присоединенное представление группы \tilde{N} в алгебре $\tilde{\mathfrak{n}}$ и образуют присоединенную группу $\text{Int}(\tilde{\mathfrak{n}})$ алгебры $\tilde{\mathfrak{n}}$. Так как $\tilde{N} = N/H$ действует на V транзитивно, то $\tilde{\mathfrak{n}}$ можно отождествить с касательным пространством T_pV , и $\text{Int}(\tilde{\mathfrak{n}})$ является замкнутой подгруппой группы $GL(T_pV)$ линейных преобразований пространства T_pV . Так как $\text{Int}(\tilde{\mathfrak{n}})$ сохраняет невырожденную положительно определенную риманову форму на T_pV , то $\text{Int}(\tilde{\mathfrak{n}})$ является замкнутой подгруппой компактной группы ортогональных преобразований $SO(T_pV)$ и поэтому компактна.

Группа $\text{Int}(\tilde{\mathfrak{n}})$ изоморфна группе $\tilde{N}/Z(\tilde{N})$, где $Z(\tilde{N})$ – центр группы \tilde{N} . Поэтому группа $\tilde{N}/Z(\tilde{N})$ компактна, алгебра Ли $\tilde{\mathfrak{n}}$ – компактная алгебра [6], $\tilde{\mathfrak{n}}$ разлагается в прямую сумму своего центра \mathfrak{z} и коммутанта $[\tilde{\mathfrak{n}}; \tilde{\mathfrak{n}}]$, $\tilde{\mathfrak{n}} = \mathfrak{z} \oplus [\tilde{\mathfrak{n}}; \tilde{\mathfrak{n}}]$. Так как все правые умножения коммутируют со всеми левыми умножениями, то \mathfrak{z} совпадает с центром всей алгебры векторных полей Киллинга \mathfrak{g} . Таким образом, имеет место разложение в прямую сумму $\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_0 \oplus \mathfrak{z} \oplus [\tilde{\mathfrak{n}}; \tilde{\mathfrak{n}}]$. Коммутант $[\tilde{\mathfrak{n}}; \tilde{\mathfrak{n}}]$ порождает чисто правые умножения, не совпадающие с левыми.

Теорема 1. Пусть \mathfrak{g} – алгебра Ли всех векторных полей Киллинга на локально однородном псевдоримановом аналитическом многообразии M ; \mathfrak{h} – её стационарная подалгебра; \mathfrak{z} – центр алгебры \mathfrak{g} ; G – односвязная подгруппа, порождённая алгеброй \mathfrak{g} ; H – её подгруппа, порождённая подалгеброй \mathfrak{h} . Если $\mathfrak{h} \cap (\mathfrak{z} + [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]) = \mathfrak{h} \cap [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$, то H замкнута в G .

Доказательство. Предположим противное. Рассмотрим замыкание \bar{H} группы H в G и подалгебру $\bar{\mathfrak{h}} \subset \mathfrak{g}$ подгруппы $\bar{H} \subset G$. Подалгебра $\bar{\mathfrak{h}}$ является нормальной подалгеброй алгебры $\bar{\mathfrak{h}}$ [2]. Будем считать, перейдя, если нужно, к сопряженной группе $g^{-1}Hg$, что для отмеченной точки $p \in M$ $X \in \bar{\mathfrak{h}} \Leftrightarrow X(p) = 0$. Рассмотрим однопараметрическую подгруппу $\bar{h}_t \in \bar{H}$, $\bar{h}_t \notin H$, определяемую векторным полем $\bar{X} \in \bar{\mathfrak{h}}$, $\bar{X} \notin \mathfrak{h}$. Как доказано в [3], существует тор T в простой компактной подгруппе $P \in G$, такой что $H \cap T$ является всюду плотной обмоткой тора T . Поэтому можно утверждать, что $\bar{h}_t \in T \subset P$. Тогда векторное поле Киллинга \bar{X} касательных векторов к орбитам локальной однопараметрической группы \bar{h}_t принадлежит алгебре \mathfrak{t} группы T и, следовательно, $\bar{X} \in \mathfrak{t} \subset \mathfrak{p}$, где \mathfrak{p} – алгебра Ли группы P . Рассмотрим окрестность единицы U в группе G и шар B_δ радиусом δ с центром в отмеченной точке $p \in M$ такие, что все элементы $g \in U$ группы G определяют локальные изометрии из шара B_δ в шар $B_{2\delta}$ радиусом 2δ с центром в $p \in M$. Отметим, что $H \subset U$. Так как элементы \bar{h}_t принадлежат замыканию \bar{H} группы H в G , то для каждого малого t внутренний автоморфизм $x \mapsto \bar{h}_t x \bar{h}_t^{-1}$ группы G является пределом последовательности внутренних автоморфизмов $x \mapsto h_n x h_n^{-1}$, $h_n \in H$. При малых t и больших n эти автоморфизмы определяют локальные изометрии шара B_δ в шар $B_{2\delta}$.

Внутренние автоморфизмы $x \mapsto h_n x h_n^{-1}$, порождающие те же локальные изометрии, что и умножение на h_n , определяют изометрии шара B_δ . Так как элементы \bar{h}_t принадлежат нормализатору группы H , то внутренние автоморфизмы $x \mapsto \bar{h}_t x \bar{h}_t^{-1}$ определяют отображения на шаре B_δ , которые являются пределами изометрий. Они также задают изометрию шара B_δ в шар B_δ . Так как для всех достаточно малых t определена локальная изометрия $x \mapsto \bar{h}_t x$ шара B_δ в шар $B_{2\delta}$, то определена и локальная изометрия $x \mapsto x \bar{h}_t^{-1} = x \bar{h}_{-t}$, и тем самым локальная однопараметрическая группа изометрий, порождённая умножениями справа на элементы \bar{h}_t .

Все умножения справа коммутируют с умножениями слева, т.е. с элементами группы G_0 . Однако могут не коммутировать друг с другом. Докажем, что локальная изометрия \bar{h}_t коммутирует со всеми правыми умножениями. Для этого покажем, что действие элемента \bar{h}_t в группе внутренних автоморфизмов группы G , $g \mapsto \bar{h}_t^{-1} g \bar{h}_t$, задает тождественное отображение на орбите V отмеченной точки p группы \tilde{N} . Рассмотрим последовательность $h_n \in H$, сходящуюся к \bar{h}_t .

Так как H является нормальным делителем в N , то $nh_n = h_n nh'_n$, $h'_n \in H$, $nH = h_n^{-1}nh_nH$. Следовательно, внутренние автоморфизмы $g \mapsto h_n^{-1}gh_n$ индуцируют тождественное отображение на V . Переходя к пределу, получим, что внутренний автоморфизм $g \mapsto \bar{h}_t^{-1}g\bar{h}_t$ индуцирует тождественное отображение на V .

Так как векторное поле X , порождающее локальную однопараметрическую группу \bar{h}_t , принадлежит компактной подалгебре алгебры \mathfrak{g} , то $X \in [\mathfrak{g}; \mathfrak{g}]$ алгебры \mathfrak{g} .

Векторное поле Z касательных векторов к орбитам локальной однопараметрической группы z_t умножений справа на \bar{h}_t является векторным полем Киллинга и принадлежит центру алгебры всех векторных полей Киллинга на M , $Z \in \mathfrak{z}$. Из разложения $\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_0 \oplus \mathfrak{z} \oplus [\mathfrak{h}; \mathfrak{h}]$ следует, что $Z \notin [\mathfrak{g}; \mathfrak{g}]$. Следовательно, $X + Z \notin [\mathfrak{g}; \mathfrak{g}]$, но $X + Z \in \mathfrak{h}$. Это доказывает теорему от противного.

Теорема 2. Пусть \mathfrak{g} – алгебра Ли всех векторных полей Киллинга на локально однородном псевдоримановом аналитическом многообразии M ; \mathfrak{h} – её стационарная подалгебра; \mathfrak{z} – центр алгебры \mathfrak{g} ; \mathfrak{r} – её радикал; G – односвязная подгруппа, порождённая алгеброй \mathfrak{g} ; H – её подгруппа, порождённая подалгеброй \mathfrak{h} . Если для любой полупростой алгебры $\mathfrak{p} \subset \mathfrak{g}$, $\mathfrak{p} + \mathfrak{r} = \mathfrak{g}$, имеет место равенство $(\mathfrak{p} + \mathfrak{z}) \cap \mathfrak{h} = \mathfrak{p} \cap \mathfrak{h}$, то H замкнута в G .

Доказательство. Предположим противное и рассмотрим замыкание \bar{H} группы H в G , а также однопараметрическую подгруппу z_t , порождённую умножением справа на элементы однопараметрической группы локальных изометрий \bar{h}_t в группе G . Пусть \bar{X} – векторное поле Киллинга касательных векторов к орбитам локальной однопараметрической группы локальных изометрий \bar{h}_t^{-1} ; Z – векторное поле Киллинга локальной однопараметрической группы локальных изометрий z_t ; \mathfrak{p} – полупростая подалгебра алгебры \mathfrak{g} , содержащая векторное поле \bar{X} , $\bar{X} \in \mathfrak{p} \subset \mathfrak{g}$. Докажем, что $Z + \bar{X} \in \mathfrak{h}$ и $Z + \bar{X} \notin \mathfrak{p}$. В односвязной группе Ли G рассмотрим радикал R (подгруппу, соответствующую подалгебре \mathfrak{r}) и полупростую подгруппу P , соответствующую подалгебре \mathfrak{p} . Тогда R – нормальный делитель группы G ; \mathfrak{r} – нормальный делитель алгебры \mathfrak{g} , $R \cap P = e$, $\mathfrak{r} \cap \mathfrak{p} = 0$, и имеет место разложение Леви – Мальцева $G = RP$.

Группа G содержит открытую окрестность единицы (chunk of a group), действующую как локальная группа локальных изометрий в окрестности отмеченной точки $p \in M$. Так как z_t принадлежит центру группы G , то $z_t \in R$. Поскольку подгруппа H является нормальным делителем группы \bar{H} [3], то $\bar{h}_t^{-1}z_tH = \bar{h}_t^{-1}H\bar{h}_t = H$. Следовательно, локальные изометрии $\bar{h}_t^{-1}z_t$ оставляют точку p неподвижной и поэтому принадлежат стационарной подгруппе H . Если учесть, что $\bar{X} \in \mathfrak{p}$, а $Z \notin \mathfrak{p}$, то $(Z + \bar{X}) \notin \mathfrak{p}$. А так как $(Z + \bar{X}) \in \mathfrak{h}$, то доказанное означает, что для выбранной максимальной полупростой алгебры \mathfrak{p} справедливо утверждение $(\mathfrak{p} + \mathfrak{z}) \cap \mathfrak{h} \neq \mathfrak{p} \cap \mathfrak{h}$, что и доказывает теорему от противного.

Неоднородные римановы аналитические многообразия

Поставим задачу найти наиболее естественное аналитическое продолжение локально заданной римановой аналитической метрики. Естественным требованием является свойство непродолжаемости искомого многообразия, введённого ещё в классической монографии С. Хелгасона [6] и Ш. Кобаяси, К. Номидзу [7]. Однако непродолжаемые многообразия могут быть весьма естественными. Например, односвязная накрывающая правой полуплоскости с 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. Однако в общем случае шар U риманова аналитического многообразия нельзя изометрически вложить в полное риманово аналитическое многообразие, т. е., вообще говоря, локально заданная риманова метрика аналитически не продолжается до метрики полного риманова многообразия. Возникает вопрос об обобщении понятия полноты.

Аналитическое продолжение римановой метрики, не допускающей векторных полей Киллинга, рассмотрено в [8, 9]. Метрики, для которых алгебра всех векторных полей Киллинга не имеет центра, изучались в [10]. Для произвольной метрики предложим следующее обобщение понятия полноты.

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

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 , $f \neq N$.

Если локально заданная риманова аналитическая метрика допускает аналитическое продолжение до полного риманова многообразия, то таковым будет определенное выше псевдополное многообразие.

Рассмотрим локально заданную риманову аналитическую метрику, алгебра Ли векторных полей Киллинга которого не имеет центра. То есть рассмотрим категорию, объектами которой являются локально изометричные ориентированные римановы аналитические многообразия, алгебра Ли векторных полей Киллинга которых не имеет центра. Морфизмами этой категории являются локально изометричные сохраняющие ориентацию накрывающие отображения $f: M \setminus S \rightarrow N$, где S – множество неподвижных точек всевозможных локальных изометрий M в себя.

Обозначим через $Z(M)$ псевдогруппу всех сохраняющих ориентацию и векторные поля Киллинга, локальных изометрий риманова аналитического многообразия M , $\varphi \in Z(M) \Leftrightarrow \forall X \in \mathfrak{g} \varphi(X) = X$.

Лемма 2. Пусть M – риманово аналитическое многообразие, удовлетворяющее свойству однозначного продолжения векторных полей Киллинга и алгебра Ли всех векторных полей Киллинга которого не имеет центра. Тогда множество $S \subset M$, состоящее из неподвижных точек всевозможных изометрий $\varphi \in Z(M)$, является аналитическим подмножеством коразмерности не меньше 2.

Доказательство. Докажем, что для любого открытого множества $U \subset M$ с компактным замыканием имеется только конечное число локальных изометрий из U в себя, принадлежащих псевдогруппе $Z(M)$. Предположим противное и рассмотрим бесконечную последовательность локальных изометрий $\varphi_i \in Z(M)$, область определения и множество значений которых лежат в U . В [9, лемма 3] по бесконечной последовательности локальных изометрий φ_i на некотором открытом множестве $V \subset U$ было построено векторное поле Киллинга X , которое при переходе к подпоследовательности удовлетворяет условию: $\forall t, |t| \leq 1, \forall i \in \mathbb{N}, \exists k(i) \in \mathbb{N}$, такое что $\lim_{i \rightarrow \infty} \varphi_i^{k(i)} = \text{Exp}tX$, где $\text{Exp}tX$ – локальная однопараметрическая группа изометрий, порождённая векторным полем X . Следовательно, для любого векторного поля Y на $V \exists i \in \mathbb{N}$ такое, что выполняется неравенство

$$\begin{aligned} |(\text{Exp}tX)_*Y - Y| &\leq \left| \varphi_{i_*}^{k(i)}Y - Y \right| + \left| (\text{Exp}tX)_*Y - \varphi_{i_*}^{k(i)}Y \right| \leq \\ &\leq 0 + \left| Y - (\text{Exp}(-tX))\varphi_{i_*}^{k(i)}Y \right| \leq \frac{1}{2} |(\text{Exp}tX)_*Y - Y|. \end{aligned}$$

Следовательно, $\forall Y \in \mathfrak{g} (\text{Exp}tX)_*Y = Y$, т.е. $[X, Y] = 0$. Но это противоречит отсутствию центра в алгебре \mathfrak{g} .

Полученное противоречие доказывает существование только конечного числа локальных изометрий из U в U , принадлежащих псевдогруппе $Z(M)$. А отсюда, как было показано в [10], уже легко следует тот факт, что множество S является аналитическим подмножеством коразмерности не меньше 2.

В силу леммы 2 многообразие $M \setminus S$ связно.

Определение 5. Ориентированное риманово аналитическое многообразие, алгебра Ли всех векторных полей которого имеет нулевой центр, называется квазиполным, если оно непродолжаемо и не допускает нетривиальных сохраняющих ориентацию и все векторные поля Киллинга локальных изометрий в себя.

Теорема 3. В любой категории локально изометричных римановых аналитических многообразий, алгебра Ли векторных полей Киллинга которых не имеет центра, существует квазиполное многообразие, и это многообразие является универсально притягивающим объектом в данной категории.

Доказательство теоремы 3 аналогично доказательству [10, теоремы 2, 3].

Следствие. Пусть φ – локальная изометрия из квазиполного многообразия M в квазиполное многообразие N . Тогда φ продолжается до изометрии $\varphi: M \approx N$.

Таким образом, если квазиполное многообразие локально однородно, то оно является однородным многообразием, а его односвязная накрывающая является квазиполным многообразием.

Список источников

1. Malcev A. On the theory of Lie groups in the large // *Мат. сб.* 1945. Т. 16 (38). С. 163–190.
2. Шевалле С. Теория групп Ли. М.: Гос. изд-во иностр. лит-ры, 1948. 316 с.
3. Mostow G.D. Extensibility of Local Lie Groups of Transformations and Groups on Surfaces // *Ann. Math.* 1950. Vol. 52. P. 606–636.
4. Попов В.А. On the Extendability of Locally Defined isometries of a Pseudo-Riemannian Manifolds // *J. of Mathematical Sciences.* 2016. Vol. 217, № 5. P. 624–627.
5. Попов В.А. On Closeness of Stationary Subgroup of Affine Transformation Groups // *Lobachevskii J. of Mathematics.* 2017. Vol. 38, № 4. P. 724–729.
6. Хелгасон С. Дифференциальная геометрия и симметрические пространства. М.: Мир, 1964. 534 с.
7. Кобаяси Ш., Номидзу К. Основания дифференциальной геометрии. Т. 1. М.: Наука, 1981.
8. Smith G.H. Analytic extension of Riemannian manifolds // *Bull. Austral. Math. Soc.* 1978. Vol. 18. P. 147–148.
9. Попов В.А. Аналитическое продолжение локально заданных римановых многообразий // *Мат. заметки.* 1984. Т. 36, вып. 4. С. 559–570.
10. Попов В.А. Продолжаемость локальных групп изометрий // *Мат. сб.* 1988. Т. 135 (177), № 1. С. 45–64.

References

1. Malcev A. On the theory of Lie groups in the large. *Math. Sb. = Rec. Math.* 1945;16(2):163-190.
2. Chevalley S. *Theory of groups Li.* Moscow: State Publishing House of Foreign Literature; 1948. 316 p. (In Russ.).
3. Mostow G. D. The Extensibility of Local Lie Groups of Transformations and Groups on Surfaces. *Ann. Math.* 1950;52:606-636.
4. Popov V.A. On the Extendability of Locally Defined isometries of a Pseudo-Riemannian Manifolds. *Journal of Mathematical Sciences.* 2016;217(5):624-627.
5. Popov V.A. On Closeness of Stationary Subgroup of Affine Transformation Groups. *Lobachevskii Journal of Mathematics.* 2017;38(4):724-729.
6. Helgason S. *Differential geometry and symmetric spaces.* Moscow: Mir Publ.; 1964. 534 p. (In Russ.).
7. Kobayashi Sh., Nomizu K. *Foundations of differential geometry.* Vol. 1. Moscow: Nauka Publ.; 1981. (In Russ.).
8. Smith G.H. Analytic extension of Riemannian manifolds. *Bull. Austral. Math. Soc.* 1978;18:147-148.
9. Popov V.A. Analytic extension of locally given Riemannian manifolds. *Mat. zametki = Mathematical Notes.* 1984;38(4):559-570. (In Russ.).
10. Popov V.A. Extendability of locally defined isometries of a pseudo-Riemannian manifold. *Math. Sb. = Rec. Math.* 1988;135(1):45-64. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 24.03.2022; одобрена после рецензирования 01.04.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 24.03.2022; approved after reviewing 01.04.2022; accepted for publication 16.05.2022.

Научная статья

УДК 531.3

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-28-35

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ШТАМПА В ФОРМЕ ПАРАБОЛОИДА ВРАЩЕНИЯ И ПОРОУПРУГОГО СЛОЯ, ЗАКРЕПЛЕННОГО НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

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

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

¹michebakov@yandex.ru ✉

²a_lena_ch@mail.ru

Аннотация. Рассматривается на основе уравнений теории пороупругих тел Ковина – Нунзиато контактная задача о внедрении жесткого штампа в форме параболоида вращения в пороупругий слой, закрепленный на упругом полупространстве. Предполагается, что в зоне контакта отсутствует трение. С помощью интегрального преобразования Ханкеля поставленная задача сводится к решению интегрального уравнения относительно неизвестного контактного напряжения. Для решения интегрального уравнения используется метод коллокаций. Найдены область контакта, значения контактных напряжений. Исследованы деформация поверхности вне штампа, связь между силой, действующей на штамп, и его перемещением. Проведен сравнительный анализ исследуемых величин для различных значений параметров пороупругого слоя и упругого основания. Численные результаты представлены в виде графиков.

Ключевые слова: контактная задача, пороупругость, модель Ковина – Нунзиато, осесимметричная задача, метод коллокаций, индентирование

Благодарности: работа финансово поддержана Южным федеральным университетом (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации). Проект № ВнГр-07/2020-07-ИМ.

Для цитирования: Чебаков М.И., Колосова Е.М. Контактная задача о взаимодействии штампа в форме параболоида вращения и пороупругого слоя, закрепленного на упругом основании // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 28–35.

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

Original article

CONTACT PROBLEM ON THE INTERACTION OF A PUNCH IN THE FORM OF A PARABOLOID OF ROTATION AND A POROELASTIC LAYER FIXED ON AN ELASTIC FOUNDATION

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

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

¹michebakov@yandex.ru ✉

²a_lena_ch@mail.ru

Abstract. The contact problem of the introduction of a rigid punch in the form of a paraboloid of rotation into a poroelastic layer fixed on an elastic half-space is considered on the basis of the equations of the theory of poroelastic bodies of Cowin-Nunziato. It is assumed that there is no friction in the contact zone. With the help of the Hankel integral transformation, the problem posed is reduced to solving the integral equation for an unknown contact stress. The collocation method is used to solve the integral equation. The area of contact, the values of

© Чебаков М.И., Колосова Е.М., 2022

contact stresses are found, and the deformation of the surface outside the punch is investigated. The relationship between the force acting on the punch and its displacement has also been investigated. A comparative analysis of the studied quantities for different values of the parameters of the poroelastic layer and the elastic foundation has been carried out. Numerical results are presented in the form of graphs.

Keywords: contact problem, poroelasticity, Cowin-Nunziato model, axisymmetric problem, collocation method, indentation

Acknowledgments: research was financially supported by Southern Federal University, grant No. VnGr-07/2020-07-IM (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation).

For citation: Chebakov M.I., Kolosova E.M. Contact Problem on the Interaction of a Punch in the Form of a Paraboloid of Rotation and a Poroelastic Layer Fixed on an Elastic Foundation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):28-35. (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

Пористые материалы – достаточно новый класс материалов с уникальными физическими, механическими, акустическими, электрическими и термическими свойствами. Благодаря оптимальному соотношению массы и прочности он широко используется в различных отраслях промышленности и строительства. Важнейшим вопросом при производстве таких материалов является контроль и оценка их механических характеристик. Существуют различные подходы.

Один из них на основе моделирования пористых материалов развит в работах Ковина – Нунзиато [1, 2]. Данная теория, называемая теорией микродилатации, была применена для исследования пористых тел с пустыми (ненасыщенными) 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. На основе теории Ковина – Нунзиато, например в работах [3, 4], решены плоские контактные задачи для полуплоскости и полосы соответственно. В [5–7] исследованы осесимметричные контактные задачи для пористого полупространства и слоя. В [8] рассмотрена осесимметричная задача о взаимодействии штампа и упругого слоя, закрепленного на пороупругом полупространстве.

Исследовано влияние параметров пороупругого слоя и упругого полупространства на контактные напряжения, приложенную нагрузку к штампу и перемещения свободной поверхности пороупругого слоя, закрепленного на упругом полупространстве, при индентировании слоя жестким штампом в форме параболоида вращения.

Постановка задач

Рассмотрим в цилиндрической системе координат (r, φ, z) осесимметричную задачу о нормальном внедрении (индентировании) на заданную глубину жесткого штампа в форме параболоида вращения в пороупругий слой $0 \leq z \leq h$, закрепленный на упругом полупространстве $z < 0$. Деформация пороупругого слоя описывается соотношениями Ковина и Нунзиато [2].

Деформация слоя $0 \leq z \leq h$, состоящего из изотропного материала с пустотами, согласно теории Ковина – Нунзиато, описывается при $k=1$ системой дифференциальных уравнений в частных производных [2]:

$$\begin{aligned} (\lambda_k + \mu_k) \frac{\partial \theta_k}{\partial r} + \mu_k \left(\Delta u_k - \frac{u_k}{r^2} \right) + \beta \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0, \quad (\lambda_k + \mu_k) \frac{\partial \theta_k}{\partial z} + \mu_k \Delta w_k + \beta \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \\ \alpha \Delta \phi - \xi \phi - \beta \theta_k = 0, \quad \Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad \theta_k = \frac{u_k}{r} + \frac{\partial u_k}{\partial r} + \frac{\partial w_k}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь α – коэффициент пустотной диффузии; β – параметр связи микродилатационных и макродилатационных свойств; ξ – пустотная жесткость; функция $\phi(r, z)$ описывает изменение объемной части пор; μ_k и λ_k – коэффициенты Ламе; u_k и w_k – перемещения вдоль осей r и z .

Деформация упругого полупространства $z < 0$ описывается первыми двумя уравнениями из (1) при $k=2$ и $\beta=0$.

Компоненты тензора напряжений в пороупругом слое определяются из соотношений (2) при $k=1$

$$\sigma_z^k = \lambda_k \theta_k + 2\mu_k \frac{\partial w_k}{\partial z} + \beta \phi, \quad \tau_{rz}^k = \mu_k \left(\frac{\partial w_k}{\partial r} + \frac{\partial u_k}{\partial z} \right). \quad (2)$$

Соотношения (2) определяют напряжения в упругом полупространстве при $k=2$ и $\beta = 0$.

При $z=h$ и $z=0$ граничные условия примут вид

$$\tau_{rz}^1(r, z) = 0, \quad \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial z} = 0 \quad (z = h), \quad w_1(r, z) = \delta(r) \quad (z = h, r \leq a), \quad \sigma_z^1(r, z) = 0 \quad (z = h, r > a),$$

$$\tau_{rz}^1(r, z) = \tau_{rz}^2(r, z), \quad w_1(r, z) = w_2(r, z), \quad u_1(r, z) = u_2(r, z) \quad (z = 0), \quad (3)$$

$$\sigma_z^1(r, z) = \sigma_z^2(r, z), \quad \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial z} = 0 \quad (z = 0), \quad \delta(r) = \delta - r^2/(2R), \quad (4)$$

где R – радиус кривизны параболы в первоначальной точке касания штампа и слоя. При $z \rightarrow -\infty$ напряжения и перемещения затухают.

Вывод интегрального уравнения относительно контактных напряжений

Для определения контактных напряжений $\sigma_z(r, 0) = q(r)$ будет построено интегральное уравнение. Предварительно будем считать их известными. Тогда приходим к решению системы (1) с новыми граничными условиями при $z=h$

$$\tau_{rz}^1(r, z) = 0, \quad \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial z} = 0, \quad \sigma_z(r, z) = q(r) \quad (r \leq a), \quad \sigma_z^1(r, z) = 0 \quad (r > a). \quad (5)$$

Неизвестные функции в системе (1) запишем в виде преобразования Ханкеля для пороупругого слоя ($k=1$) и упругого полупространства ($k=2$) соответственно

$$u_k(r, z) = \int_0^\infty A_k(u, z) J_1(ur) u du, \quad w_k(r, z) = \int_0^\infty B_k(u, z) J_0(ur) u du \quad (k=1, 2),$$

$$\phi(r, z) = \int_0^\infty F(u, z) J_0(ur) u du,$$

где $J_i(u)$ ($i = 0, 1$) – функции Бесселя. Для нахождения функций $A_k(u, z)$, $B_k(u, z)$, $F(u, z)$ придем к решению системы дифференциальных уравнений для пороупругого слоя

$$c_1^2 D^2 A_1 - u^2 A_1 - (1 - c_1^2) u DB_1 - u HF = 0, \quad D = d/dz, \quad (1 - c_1^2) u DA_1 + D^2 B_1 - c_1^2 u^2 B_1 + HDF = 0, \quad (6)$$

$$l_1^2 (D^2 F - u^2 F) - \frac{l_1^2}{l_2^2} F - u A_1 - DB_1 = 0$$

и упругого полупространства

$$c_2^2 D^2 A_2 - u^2 A_2 - (1 - c_2^2) u DB_2 = 0, \quad (1 - c_2^2) u DA_2 + D^2 B_2 - c_2^2 u^2 B_2 = 0. \quad (7)$$

На основе граничных условий (5) получим

$$DA_1 - uB_1 = 0, \quad DF = 0, \quad (1 - 2c_1^2) u A_1 + DB_1 + HF = Qc_1^2 \mu_1^{-1} \quad (z = h),$$

$$B_1 = B_2, \quad A_1 = A_2, \quad \mu_1 (DA_1 - uB_1) = \mu_2 (DA_2 - uB_2), \quad DF = 0 \quad (z = 0), \quad (8)$$

$$((1 - 2c_1^2) u A_1 + DB_1 + H_2 F) \mu_1 c_1^{-2} = ((1 - 2c_2^2) u A_2 + DB_2) \mu_2 c_2^{-2} \quad (z = 0),$$

$$Q(u) = \int_0^a q(r) J_0(ur) r dr, \quad q(r) = \int_0^\infty Q(u) J_0(ur) u du.$$

Здесь использованы следующие обозначения [9]: $c_k^2 = \frac{\mu_k}{(\lambda_k + 2\mu_k)}$, $H = \frac{\beta}{\lambda_2 + 2\mu_2}$, $l_1^2 = \frac{\alpha}{\beta}$, $l_2^2 = \frac{\alpha}{\xi}$.

Общее решение системы (6) может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} A_1(u, z) &= (d_1 + d_2 z)e^{uz} + (d_3 + d_4 z)e^{-uz} + d_5 e^{mz} + d_6 e^{-mz}, \\ B_1(u, z) &= (s_1 + s_2 z)e^{uz} + (s_3 + s_4 z)e^{-uz} + s_5 e^{mz} + s_6 e^{-mz}, \\ F(u, z) &= (t_1 + t_2 z)e^{uz} + (t_3 + t_4 z)e^{-uz} + t_5 e^{mz} + t_6 e^{-mz}. \end{aligned}$$

Общее решение системы (7) может быть представлено в виде

$$A_2(u, z) = (a_1 + a_2 z)e^{uz}, \quad B_2(u, z) = (b_1 + b_2 z)e^{uz},$$

где параметры s_i , t_i ($i=1, \dots, 6$) легко выражаются через d_1, d_2, d_3, d_4 , а параметры b_1 и b_2 – через a_1, a_2 .

Для нахождения коэффициентов $a_1, a_2, d_1, d_2, d_3, d_4$ воспользуемся граничными условиями (7). В результате найдем выражение для $B_1(u, h)$,

$$B_1(u, h) = \frac{Q(u)}{2\mu_1(1-c_1^2)} L(u), \quad L(u) = \frac{L_1(s)}{L_2(s)} \quad (s = ul_2). \quad (9)$$

Здесь функции $L_1(s)$ и $L_2(s)$ имеют следующую структуру:

$$\begin{aligned} L_1(s) &= ch(Td)[2ch(2sd)L_{11}(s) + L_{12}(s)] + sh(Td)[ch(2sd)L_{13}(s) + sh(2sd)L_{14}(s) + L_{15}(s)], \\ L_2(s) &= ch(Td)[2ch(2sd)L_{21}(s) + sh(2sd)L_{22}(s) + L_{23}(s)] + sh(Td)[ch(2sd)L_{24}(s) + L_{25}(s) + \\ &\quad + sh(2sd)L_{26}(s) + L_{27}(s)] + ch(2sd)L_{28}(s) + sh(2sd)L_{29}(s). \end{aligned} \quad (10)$$

Выражения для $L_{ij}(s)$ имеют довольно громоздкий вид и здесь не приводятся.

$L_{ij}(s)$ ($i=1,2; j=1, \dots, 9$) содержат степенные функции от s , величину $T = \sqrt{s^2 - N + 1}$ в первой степени и параметры $d = h/l_2$, $\mu = \mu_2/\mu_1$.

Используя граничное условие $w_1(r, 0) = \delta(r)$ при $r \leq a$ и $z = h$, из (3) найдем

$$w_1(r, h) = \frac{1}{2\mu_1(1-c_1^2)} \int_0^\infty Q(u)L(u)uJ_0(ur)du = \delta(r) \quad (r \leq a). \quad (11)$$

Подставляя в (11) выражение для $Q(u)$ из (8) и удовлетворяя граничному условию $w_1(r, z) = \delta(r)$ ($z = h, r \leq a$) из (3), после замены $r = xl_2$, $\rho = yl_2$, $u = s/l_2$, $h = dl_2$ получим искомое интегральное уравнение для определения контактных напряжений под штампом $q(r) = \sigma(r/l_2)$

$$\int_0^b \sigma(y)yk(y, x)dy = \frac{\mu_1 \delta}{(1-\nu_1)l_2} \delta(xl_2) \quad (x \leq b), \quad k(y, x) = \int_0^\infty L(s)sJ_0(sx)J_0(sy)ds. \quad (12)$$

Здесь $2(1-c_1^2) = (1-\nu_1)^{-1}$, где ν_1 – коэффициент Пуассона для упругого слоя, $b = a/l_2$.

Решение интегрального уравнения

Для решения интегрального уравнения (12) с символом ядра $L(s)$ из (9), (10) применим прямой метод коллокаций [10]. Разобьем отрезок $[0, b]$ на n частей набором точек $b_j = \varepsilon j$ ($\varepsilon = b/n$, $j = 0, 1, \dots, n$) и будем считать, что на каждом отрезке $[b_{j-1}, b_j]$ контактные напряжения имеют постоянное значение σ_j . Пусть $x_k = (b_k + b_{k-1})/2$ есть точки коллокаций, тогда интегральное уравнение дискретизируем по следующей схеме с учетом (4):

$$\sum_{j=1}^n \sigma_j \int_{b_{j-1}}^{b_j} k(y, x_k) y dy = \frac{\mu_1 \delta}{(1-\nu_1)l_2} \left(1 - \frac{x_k^2 l_2^2}{2R\delta}\right) \quad (k = \overline{1, n}).$$

В результате получим систему для определения σ_j

$$\sum_{j=1}^n \sigma_j a_{kj} = \frac{\mu_1 \delta}{1-\nu_1} \left(1 - \frac{x_k^2}{2R^*}\right), \quad R^* = \frac{R\delta}{l_2^2}, \quad (13)$$

где $a_{kj} = \int_0^\infty L(s)J_0(sx_k)[b_j J_1(sb_j) - b_{j-1} J_1(sb_{j-1})] ds$.

Силу, действующую на штамп, найдем из соотношения

$$P = 2\pi \int_0^a q(r)rdr = 2\pi l_2^2 \int_0^b \sigma(x)xdx = 2\pi \varepsilon l_2^2 \sum_{k=1}^n \sigma_k x_k .$$

Числовые расчеты

Приведенная выше схема решения интегрального уравнения позволяет рассчитать контактные напряжения, форму поверхности вне штампа, силу, действующую на штамп при заданной величине его перемещения δ . В расчетах основное внимание уделялось влиянию параметров N , $\mu = \mu_2/\mu_1$, $d=h/l_2$ на исследуемые величины.

Безразмерные контактные напряжения $q^*(x) = \sigma(x) \frac{(1-\nu_1)l_2}{\mu_1 \delta}$ на границе $z=h$ показаны на рис. 1а–3а, приведенная деформация $w^*(x) = l_2^{-1}w(xl_2)$ поверхности $z=h$ вне штампа – на рис. 1б–3б. Отметим, что здесь при расчетах полагалось $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$, $b = 1$. Вычисления проводились с погрешностью не более 3 %, для этого было достаточно брать в системе (13) $n=50$. При этих же параметрах вычислялась безразмерная сила $P^* = \frac{1-\nu_1}{\mu_1 \delta l_2} P$.

На рис. 1 приведены q^* , w^* при $N=0,5$, $d=1$, $R^*=1$ и различных значениях μ . Отметим, что $q^*(0)=0,964$, $P^*=1,608$ при $\mu=0,5$, $b=0,915$; $q^*(0)=1,190$, $P^*=2,391$ при $\mu = 1$, $b=1,01$; $q^*(0)=1,441$, $P^*=3,314$ при $\mu = 2$, $b=1,093$. На графиках указаны значения μ .

На рис. 2 приведены q^* , w^* при $N=0,5$, $\mu=2$, $R^*=1$ и различных значениях параметра d . Отметим, что $q^*(0)=1,441$, $P^*=3,314$ при $d=1$, $b=1,093$; $q^*(0)=1,769$, $P^*=3,971$ при $d=0,5$, $b=1,102$; $q^*(0)= 2,082$, $P^*=4,516$ при $d=0,25$, $b=1,090$; $q^*(0)= 2,325$, $P^*=4,958$ при $d=0,1$, $b=1,070$. На графиках указаны значения d .

На рис. 3 приведены q^* , w^* при $d=1$, $\mu=2$, $R^*=1$ и различных значениях параметра N . Отметим, что $q^*(0)=1,441$, $P^*=3,314$ при $N=0,5$, $b=1,093$; $q^*(0)=1,504$, $P^*=3,569$ при $N=0,3$, $b=1,110$; $q^*(0)= 1,574$, $P^*=3,830$ при $N=0$, $b=1,127$. На графиках указаны значения N .

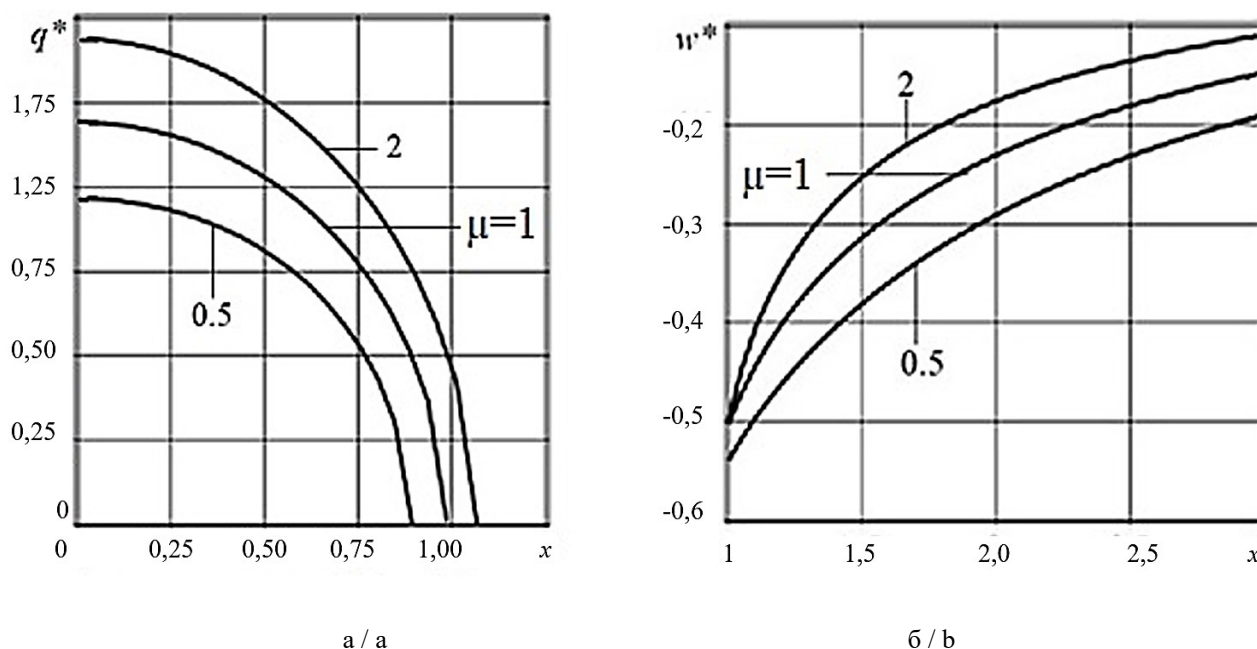


Рис. 1. Контактные напряжения (а) и перемещения поверхности $z=h$ (б) вне штампа при различных значениях μ / Fig. 1. Contact stress (a) and displacements of the surface $z=h$ (b) outside the punch at different values of μ

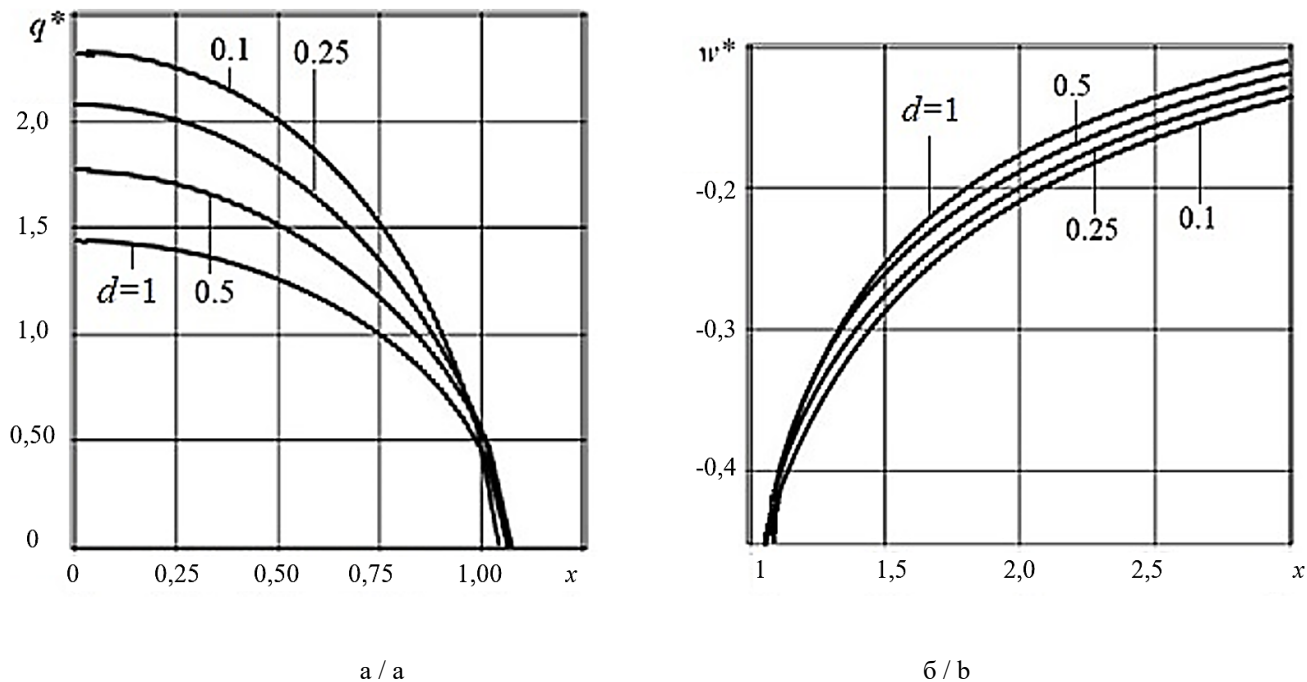


Рис. 2. Контактные напряжения (а) и перемещения поверхности $z=h$ (б) вне штампа при различных значениях d / Fig. 2. Contact stress (a) and displacements of the surface $z=h$ (b) outside the punch at different values of d

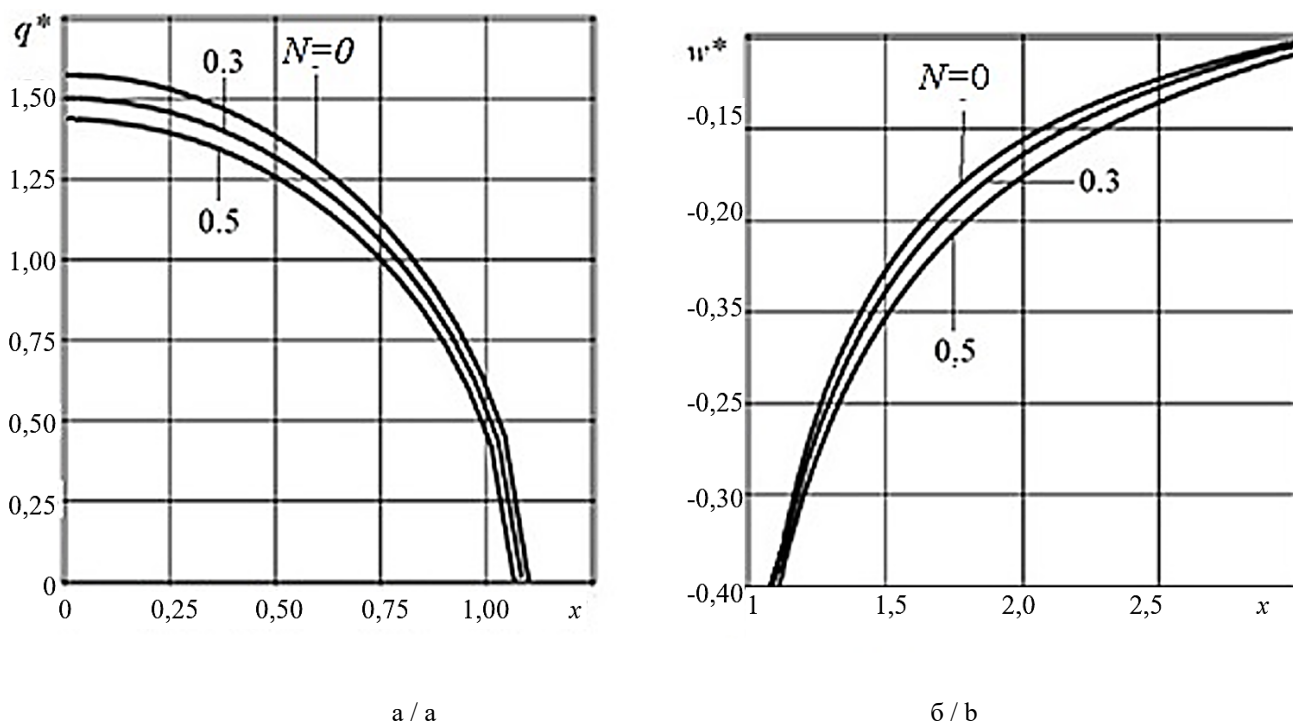


Рис. 3. Контактные напряжения (а) и перемещения поверхности $z=h$ (б) вне штампа при различных значениях N / Fig. 3. Contact stress (a) and displacements of the surface $z=h$ (b) outside the punch at different values of N

Выводы

Расчеты показывают, что увеличение пористости слоя при постоянной величине смещения штампа, радиуса кривизны штампа R и других параметров приводит к уменьшению контактных напряжений под штампом, величины приложенной силы, области контакта и увеличению перемещений поверхности $z = h$. Такая же картина наблюдается при уменьшении параметра μ , характеризующего относительную жесткость пороупругого слоя.

Увеличение относительной толщины пороупругого слоя при фиксированных значениях других параметров приводит к уменьшению максимальных контактных напряжений, величины приложенной силы и перемещений свободной поверхности слоя вне штампа. Влияние этого фактора менее заметно, чем изменение относительной жесткости пороупругого слоя.

Следует отметить, что величина области контакта не сильно отличается при изменении толщины пороупругого слоя d или параметра пористости N при фиксированных значениях других параметров пороупругого слоя и упругого полупространства (рис. 2 и 3).

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., Poddubnyy A.A., Kolosova E.M., Alexiev A., Datcheva M. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic foundation // *Materials Physics and Mechanics.* 2020. Vol. 44. P. 423–432.
6. Chebakov M.I., Poddubnyy A.A., Kolosova E.M., Alexiev A.R., Iankov R.Z. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic layer // *Comptesrendus de l'Acad_emiebulgare des Sciences.* 2020. T. 73, № 6. P. 846–855.
7. 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.
8. 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.
9. Iesan D., Nappa L. Axially symmetric problems for a porous elastic solid // *International J. of Solids and Structures.* 2003. Vol. 40. P. 5271–5286.
10. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 256 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., Poddubnyy A.A., Kolosova E.M., Alexiev A., Datcheva M. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic foundation. *Materials Physics and Mechanics.* 2020;44:423-432.
6. Chebakov M.I., Poddubnyy A.A., Kolosova E.M., Alexiev A.R., Iankov R.Z. Contact interaction of axisymmetric indenter and poroelastic layer. *Comptesrendus de l'Acad_emiebulgare des Sciences.* 2020;73(6):846-855.
7. Kolosova E.M., Chebakov M.I. Analytical Solution of Axisymmetric Contact Problem for a Poroelastic Layer. *Mechanics of Solids.* 2020;55(6):857-864.
8. 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.

9. Iesan D., Nappa L. Axially symmetric problems for a porous elastic solid. *International J. of Solids and Structures*. 2003;40:5271-5286.

10. Belotserkovsky S.M., Lifanov I.K. *Numerical methods in singular integral equations and their applications to aerodynamics, theory of elasticity and electrodynamics*. Moscow: Nauka Publ., The Main Editorial Office of the Physical and Mathematical Literature; 1985. 256 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 21.02.2022; одобрена после рецензирования 02.03.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 21.02.2022; approved after reviewing 02.03.2022; accepted for publication 16.05.2022.*

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 631.435

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-36-46

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЧВЫ В РАЗНЫХ ШКОЛАХ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

О.С. Безуглова¹, В.Э. Болдырева², И.В. Морозов³, С.С. Тагивердиев⁴✉, С.Н. Горбов⁵

^{1,2,3,4,5}Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ osbesuglova@sfedu.ru

² maskow@mail.ru

³ migovad@sfedu.ru

⁴ 2s-t@mail.ru✉

⁵ sngorbov@sfedu.ru

Аннотация. Рассмотрены применяемые в настоящее время классификации почв по гранулометрическому составу: отечественная (Н.А. Качинского) и зарубежные (министерства сельского хозяйства США и Всемирной справочной базы почвенных ресурсов). Представлены некоторые разночтения в природе объекта исследования (элементарных почвенных частиц), в ширине границ основных текстурных классов, а также в необходимости учитывать при классифицировании возможные пути их формирования. Под этим углом зрения исследовано 57 индивидуальных почвенных образцов чернозёма обыкновенного карбонатного Ростовской области. Сравнительный анализ данных гранулометрического анализа проводился по результатам, полученным методом лазерной дифракции, поскольку он не имеет принципиальной связи ни с одной из рассматриваемых классификаций и в силу этого свободен от сложившихся стереотипов. Возможность выбора условий почвообразования, представленная в отечественной классификации, при интерпретации экспериментальных данных оказывается решающей. В рассматриваемом примере она позволяет оценить разновидность текстурного класса как глины – от легкой до тяжелой – в зависимости от того, к какому типу почвообразования отнесен почвенный образец. Вследствие разночтений в определении границ основных текстурных классов наблюдается перераспределение элементарных почвенных частиц, тогда как по факту их количество не изменяется. Все эти отличия имеют особенное значение при проведении исследований международными научными коллективами и сопоставлении данных, полученных в разных странах.

Ключевые слова: классификация почв по гранулометрическому составу, элементарные почвенные частицы, метод лазерной дифракции, чернозём обыкновенный

Благодарности: исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания (Южный федеральный университет, проект № 0852-2020-0029) с использованием оборудования ЦКП «Биотехнология, биомедицина и экологический мониторинг» и ЦКП «Высокие технологии» Южного федерального университета, а также при государственной поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-449.2022.5).

Для цитирования: Безуглова О.С., Болдырева В.Э., Морозов И.В., Тагивердиев С.С., Горбов С.Н. Интерпретация результатов гранулометрического анализа почвы в разных школах почвоведения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 36–46.

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

Original article

INTERPRETATION OF THE RESULTS OF PARTICLE SIZE ANALYSIS OF SOILS BY VARIOUS SCHOOLS OF SOIL SCIENCE

O.S. Bezuglova¹, V.E. Boldyreva², I.V. Morozov³, S.S. Tagiverdiev⁴✉, S.N. Gorbov⁵

^{1,2,3,4,5}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ osbesuglova@sfnu.ru

² maskow@mail.ru

³ migovad@sfnu.ru

⁴ 2s-t@mail.ru✉

⁵ sngorbov@sfnu.ru

Abstract. The article discusses a few of today's applicable soil classifications in terms of their texture: the one by A. Kachinsky (Russians) and other two – by the US Department of Agriculture (USDA) and the World Reference Base for Soil Resources (WRB). The article also presents several discrepancies in the nature of the source of research (primary soil particles), the width of the borders of the key textural classes, and also in the need to take into account possible ways of their formation when classifying. Bearing it in mind, we have studied 57 separate soil samples of the Calcic Chernozem of the Rostov Region. The comparative study of the results of the particle-size distribution analysis was performed based on the results obtained with the help of the laser diffraction method, since it is not directly related to any of the above classifications, thus being free from whatever lasting stereotypes.

The choice of options for the conditions of soil formation as presented in the Russian classification seems a key decisive parameter while interpreting experimental results. In the example under consideration, this classification allows for defining the variety of a textural class as clay (from light to heavy) depending on what type of soil formation the sample may be related to. Due to some discrepancies in determining the boundaries of the textural classes, we have observed redistribution of primary soil particles whereas their factual amount remains unchanged. All these differences are vital nowadays in view of globalization and boost in the number and importance of international research.

Keywords: soil texture classification, primary soil particles, laser diffraction method, Calcic Chernozem

Acknowledgments: the research was financially supported of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task (Southern Federal University, project No. 0852-2020-0029) using the equipment of the Center for Collective Use "Biotechnology, Biomedicine and Environmental Monitoring" and the Center for Collective Use "High Technologies", Southern Federal University, as well as state support of the leading scientific school of the Russian Federation (NSh-449.2022.5).

For citation: Bezuglova O.S., Boldyreva V.E., Morozov I.V., Tagiverdiev S.S., Gorbov S.N. Interpretation of the Results of Particle Size Analysis of Soils by Various Schools of Soil Science. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):36-46. (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

Гранулометрический состав является фундаментальной генетической характеристикой почвы, от которой зависят практически все её свойства в целом. В этом сходятся мнения большинства учёных-почвоведов, однако вследствие самостоятельного развития почвоведения разных стран, в том числе относительной изоляции советской школы, возникла несогласованность в использовании понятий и терминов различными национальными школами почвоведения [1–3]. И если само определение понятия гранулометрического состава как относительного соотношения частиц или механических элементов, выраженного в процентах, совпадает, то далее наблюдается целый ряд разночтений. В настоящее время они касаются того, что именно представляют собой элементарные почвенные частицы (ЭПЧ) и какую размерность имеют границы фракций основных текстурных классов, не совпадают также методы определения гранулометрического состава, соответственно, и интерпретация полученных данных. К числу проблем, осложняющих вопросы классификации и систематики, несомненно, следует отнести сложность и разнообразие самого объекта исследования [4].

Принято считать, что ЭПЧ – это обособленные обломки горных пород и минералов, а также аморфные соединения (органические и органоминеральные), все элементы которых находятся в химической взаимосвязи и не поддаются пептизации общепринятыми методами, применяемыми при подготовке почвы к гранулометрическому анализу. Понятие ЭПЧ в физику почв было введено А.Д. Ворониным [5]. Из приведенного определения следует, что выполнение гранулометрического анализа почв предполагает выбор метода, в том числе способов подготовки образца к анализу и количественного учёта, с соблюдением условий, при которых в анализируемую суспензию непременно попадут механические элементы различного происхождения – минеральные, органические и органоминеральные. Это требование вытекает из представлений о природе, происхождении, составе и свойствах ЭПЧ. В этом, на наш взгляд, кроется главное противоречие, потому как почвоведы США, Канады, Великобритании и ряда других стран под механическими элементами подразумевают только частицы минерального происхождения [6–8]. Эти отличия отражены и в способах предварительной подготовки образцов к гранулометрическому анализу, принятых в различных странах, в соответствии с разными представлениями об объекте количественного учета.

Проблема несогласованности в базовом понятии и, как следствие, в классификации ЭПЧ вызывает необходимость поиска путей устранения данных несоответствий, определения возможности сопоставления классификаций и сравнительного анализа данных, получаемых учеными разных стран в этой области. Отсюда вопросы: какова вероятность применения обобщенного метода исследования гранулометрического состава для согласования характеристик изучаемого объекта? Какие дополнительные теоретические и прикладные исследования необходимо провести для определения дальнейшего развития, или же различия между рассматриваемыми классификациями столь существенны, что в рамках международного сотрудничества возможно лишь одновременное определение гранулометрического состава почв с использованием двух подходов (методов, классификаций) и с внесением соответствующих поправок, минимизирующих недопонимание [2].

Цель данной работы – изучить некоторые из существующих противоречий российской и зарубежных классификаций ЭПЧ и почв по гранулометрическому составу, определить их величину и значимость на современном этапе развития почвоведения.

Объекты и методы

Методологический принцип, положенный нами в основу исследований: проводить сравнительный анализ классификаций можно только в том случае, если сопоставимы объекты классификационных построений, методы пробоподготовки, методы количественного учета, результаты исследований, а в итоге и объекты дефиниций. Исходя из этого, была выбрана следующая схема проведения сравнительного анализа: подготовка почвы к анализу – количественный учет ЭПЧ по фракциям – интерпретация результатов – сравнительный анализ схем и классификаций.

Для обеспечения репрезентативности были исследованы 57 индивидуальных почвенных образцов чернозёма обыкновенного карбонатного, отобранных из разрезов, заложенных на ООПТ «Персиановская степь», Ростовская область, и в Ботаническом саду Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону.

Предварительная подготовка образца почвы по методикам, принятым в российском почвоведении, позволяет учитывать ЭПЧ различной природы. Зарубежные школы почвоведения (США, Великобритания) используют методы, которые позволяют учитывать только механические элементы минерального происхождения. В эксперименте нами принята пробоподготовка по Качинскому в модификации Долгова – Личмановой, не предусматривающая устранение частиц органической и органоминеральной природы.

В качестве способа количественного учета был выбран метод лазерной дифракции, использовали блок мокрого диспергирования лазерного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoTec (ISO 13320-1:1999). Этот метод в последнее время всё чаще используется для исследования гранулометрического состава почв [7, 9–12]. В нём предусмотрена возможность выставлять необходимые границы фракций, характерные для сравниваемых классификаций, и определять фракционный состав образца таким образом, что возможен дальнейший пофракционный сравнительный анализ полученных результатов. Данный метод принципиально не связан ни с одной из сравниваемых классификаций, что, на наш взгляд, позволяет использовать его в качестве независимого от сложившихся стереотипов в специальных исследованиях практической направленности.

Программное обеспечение метода позволяет произвести необходимые настройки процесса, в том числе выбрать длительность диспергирования, число измерений, временные интервалы и пр. Нами были заданы необходимые для различных классификаций границы фракций.

Для интерпретации полученных результатов были использованы следующие классификации почв по гранулометрическому составу:

- классификация почв по механическому составу Н.А. Качинского [13];
- классификация текстуры почвы Министерства сельского хозяйства США (USDA) [8];
- классификация Всемирной справочной базы почвенных ресурсов [14].

Результаты исследования

В табл. 1 представлены в обобщенной форме разночтения сравниваемых классификаций. Основная несогласованность проявляется в различных представлениях о природе ЭПЧ, но к ней добавляется и разница в классификационных построениях, основанных на размере частиц.

Таблица 1 / Table 1

Разночтения между отечественной и некоторыми зарубежными классификациями ЭПЧ / Discrepancies among Russia and some USA and UK PSP classifications

Страна	Объект гранулометрического анализа	Границы между фракциями, мм		Источник
		песка и пыли	пыли и ила	
Россия	Частицы минеральной, органоминеральной, органической природы	0,05	0,001	[5, 13, 15]
США, Канада (USDA)	Частицы минерального происхождения	0,05	0,002	[8, 16, 17]
Великобритания и некоторые другие европейские страны (WRB)	Частицы минерального происхождения	0,063	0,002	[6, 14]

Так, согласно принятой в России классификации Н.А. Качинского [13], в почвах встречаются ЭПЧ различных размеров – от >3 мм до $<10^{-4}$ – 10^{-5} мм. Для удобства последующей систематики почв по гранулометрическому составу все механические элементы объединяются в определенные группы и/или фракции ЭПЧ. В зарубежной научной литературе используется так называемая международная классификация, одобренная I Международным конгрессом почвоведов в Вашингтоне в 1927 г. Несоответствие фракционных границ рассматриваемых нами классификаций представлено в табл. 2.

Различия, отмеченные в размерности фракций, оказываются не столь существенными на фоне различий в подходах к выполнению гранулометрического анализа, которые отражаются как на изучении состава и свойств самих ЭПЧ, так и на определении гранулометрического состава почв в целом. Поэтому для того, чтобы провести детальное сравнение рассматриваемых классификаций, нами был проведен модельный эксперимент с оптимизацией всех этапов производства гранулометрического анализа почв с учетом особенностей каждой классификации.

Для интерпретации результатов, полученных методом лазерной дифракции, за рубежом используется трехчленная классификация почв по гранулометрическому составу [10]. Её отличие от российской не только в смещении границ основных классов, как показано в табл. 2, но и в том, что при оценке результатов в ней не принимается во внимание разница в условиях почвообразования. Учитывая, что зарубежные классификации при определении текстурного класса почвы ограничиваются определением только минеральных ЭПЧ, это можно признать обоснованным. В российском почвоведении, как уже было отмечено выше, при определении гранулометрического состава и классификационной принадлежности используются ЭПЧ различного происхождения, поэтому учет условий среды, в которых проходило формирование ЭПЧ, представляется необходимым. Обусловлено это тем, что почва, по определению В.В. Докучаева, – функция, которая находится в зависимости от климата, живых организмов, почвообразующей породы и рельефа, следовательно, и все ее компоненты находятся в той же зависимости. Поэтому при определении ее текстурных классов пренебрегать условиями почвообразования методически неправильно.

Таблица 2 / Table 2

Фракционные границы и их несоответствие в классификациях почв по гранулометрическому составу Н.А. Качинского, по данным Всемирной справочной базы почвенных ресурсов (WRB) и министерства сельского хозяйства США (USDA) / Fraction boundaries and their differences among the soil texture classifications by N. A. Kachinski, World Reference Base for Soil Resources (WRB), and the U.S. Department of Agriculture (USDA)

Н.А. Качинский		USDA	WRB	Фракция
Фракция	Размер фракций ЭПЧ, мм			
Ил	< 0,001	< 0,002	< 0,002	Clay (глина)
Мелкая пыль	0,001–0,005			
Средняя пыль	0,005–0,01	0,002–0,05	0,002–0,063	Silt (пыль)
Крупная пыль	0,01–0,05			
Песок мелкий	0,05–0,25	0,05–0,1	0,063–0,125	Very fine sand (очень мелкий песок)
		0,1–0,25	0,125–0,20	Fine sand (мелкий песок)
Песок средний	0,25–0,5	0,25–0,5	0,20–0,63	Medium sand (средний песок)
Песок крупный	0,5–1,00	0,5–1,00	0,63–1,25	Coarse sand (крупнозернистый песок)
Гравий	1,00–3,00	1,00–2,00	1,25–2,00	Very coarse sand (очень крупнозернистый песок)

В табл. 3 представлены результаты определения гранулометрического состава, полученные методом лазерной дифракции, для горизонта С чернозёма обыкновенного карбонатного, глубина залегания которого (100–145 см) делает его, казалось бы, наименее подверженным влиянию окружающей среды. Интерпретация проводилась по классификации Н.А. Качинского, учитывающей тип почвообразования. Результаты показали, что при интерпретации экспериментальных данных решающим оказывается выбор типа почвообразования: разновидность текстурного класса глины определяется от легкой до тяжелой в зависимости от того, к какому типу почвообразования отнесена почва. Так, если разновидность почвы определяется в соответствии с действительным типом почвообразования, то гранулометрический состав классифицируется как легкоглинистый. При таких же показателях для почв подзолистого типа почвообразования гранулометрический состав определили бы как среднеглинистый, а для солонцов – как тяжелоглинистый.

Таблица 3 / Table 3

Результаты определения гранулометрического состава почвы в горизонте С чернозёма обыкновенного карбонатного (Ботанический сад Южного федерального университета) и их интерпретация по Н.А. Качинскому / Results of defining the primary soil particles composition of the soil at horizon C of Calcic Chernozem at the Botanical Garden of Southern Federal University and their interpretation by N.A. Kachinski

Фракция	Размер фракций ЭПЧ, мм	Содержание ЭПЧ, %
Ил	<0,001	6,44±0,10
Мелкая пыль	0,001–0,005	36,29±0,27
Средняя пыль	0,005–0,01	22,36±0,85
Крупная пыль	0,01–0,05	19,36±0,34
Песок мелкий	0,05–0,25	15,55±1,00
Песок средний	0,25–0,5	0,00±0,00
Песок крупный	0,5–1,00	0,00±0,00
Гравий	1,00–3,00	0,00±0,00
Сумма частиц < 0,01 % 65,09±1,06	Степной тип почвообразования	Глина лёгкая

Обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что изменение градации илистой фракции в зарубежных классификациях с 0,001 мм (классификация Качинского) на 0,002 мм (классификации USDA и WRB) приводит к увеличению ее количества в последних в 1,5–2 раза. Соответственно, и в содержании общей пыли наблюдаются существенные различия, поскольку верхняя граница илистой фракции изменена (сдвинута).

Суммарное количество физического песка чаще всего совпадает, так как граница этой фракции во всех рассматриваемых нами классификациях находится приблизительно на одном уровне. Похожие закономерности в отношении общего количества песка установили М. В. Вайчис, И. П. Мажвила [18] при исследовании почв Литвы двумя методами – Качинского и ФАО (Фере).

Однако если рассматривать различия по фракциям песка, картина меняется. Покажем это на примере почвы горизонта С чернозёма обыкновенного карбонатного (табл. 4). Общее количество песка в образце составило 15,55 %, и по классификации Качинского весь он определяется как фракция мелкого песка. USDA выделяет фракцию очень тонкого песка, куда попадает 0,03 %, остальные 15,52 % классифицируются как тонкий песок. В классификации WRB вследствие расширения границ среднего песка распределение песчаных частиц более дробное: фракция среднего песка – 0,01 %, тонкого песка – 12,62 %, а очень тонкого – 2,92 %.

Таблица 4 / Table 4

Гранулометрический состав горизонта С чернозёма обыкновенного карбонатного в контексте обсуждаемых классификаций / Particle-size distribution of the C horizon of ordinary carbonate chernozem in the context of the discussed classifications

Н.А. Качинский				USDA		WRB			
Фракция	Размер фракций ЭПЧ, мм	Содержание ЭПЧ, %	Фракция	Содержание ЭПЧ, %	Размер фракций ЭПЧ, мм	Содержание ЭПЧ, %	Размер фракций ЭПЧ, мм	Содержание ЭПЧ, %	Фракция
Ил	<0,001	6,44±0,10	Ил	6,44±0,10	<0,002	17,41±0,27	<0,002	17,41±0,27	Clay
Мелкая пыль	0,001–0,005	36,29±0,27	Пыль	78,01±0,19	0,002–0,05	67,04±0,22	0,002–0,063	67,04±0,22	Silt
Средняя пыль	0,005–0,01	22,36±0,85							
Крупная пыль	0,01–0,05	19,36±0,34							
Песок мелкий	0,05–0,25	15,55±1,00	Песок 1,00–0,25	15,55±0,28	0,05–0,1	0,03±0,01	0,063–0,125	2,92±0,41	Very fine sand
					0,1–0,25	15,52±0,27	0,125–0,20	12,62±0,38	Fine sand
Песок средний	0,25–0,5	0,00±0,28			0,25–0,5	0,00±0,00	0,20–0,63	0,01±0,00	Medium sand
Песок крупный	0,5–1,00	0,00±0,00			0,5–1,00	0,00±0,00	0,63–1,25	0,00±0,00	Coarse sand
Гравий	1,00–3,00	0,00±0,00	Гравий	0,00±0,00	1,00–2,00	0,00±0,00	1,25–2,00	0,00±0,00	Very coarse sand
Почва по гранулометрическому составу									
Глина легкая					Silty loam (пылеватый суглинок)				

На начальных этапах формирования классификаций механических элементов градации размерности частиц были обусловлены возможностями оборудования, которым располагали исследователи (размерность ячеек сит, мощность микроскопа). Затем сказалась преемственность, которой в той или иной степени обладают все рассматриваемые классификации. Например, фракция, которую позже Уитни назвал фракцией тонкого песка, впервые была выделена Осборном,

вероятно потому, что таковы были возможности оборудования, которым он располагал. Ученые смещали, преобразовывали, дополняли существующие границы фракционных классов. Находились различные обоснования разделения частиц по размерам, чаще всего математические. Например, разные размерные классы предлагалось определять на последовательной математической основе десятичной логарифмической шкалы, причем каждый последующий класс должен был делить размер предыдущего класса пополам, определяя ширину фракционных границ [19]. В результате исследователи в стремлении создать удобную и простую в использовании и запоминании классификацию отдалялись от главного, что должно определять границы основных гранулометрических классов, – природы происхождения частиц.

Первым к необходимости уточнения и обоснования фракционных границ с позиции химических, физических, физико-химических и физико-механических свойств пришел А. Аттерберг [20]. Он исследовал коагуляционную способность механических элементов почв различной крупности, определив глинистые свойства для частиц размером $<0,02$ мм, тогда как в отечественной классификации эта граница – $0,01$ мм. Верхняя граница илистой фракции ($<0,002$ мм) также обоснована исследованиями свойств ЭПЧ, а именно резко выраженной пластичности. Однако исследования П.Ф. Мельникова [21], Е.И. Кочериной [22], А.И. Личмановой [23], В.М. Безрука [24] сместили границу до $0,001$ мм. Тем не менее до настоящего времени в этом вопросе нет единого мнения и высказываются предложения о сдвиге границы в сторону увеличения до $0,002$ мм [3]. Это мнение явно заслуживает внимания, потому что, как справедливо отмечают авторы, это облегчило бы сопоставление результатов, полученных исследователями разных школ почвоведения, и сократило бы время отбора пробы для определения илистой фракции в пипет-методе, что тоже немаловажно. Однако такая поправка к классификации гранулометрических элементов осложнит сопоставление с уже имеющимися в базах данных и в литературе прошлых лет результатами исследований. Хотя она и не изменит принципов определения класса почв по гранулометрическому составу, но, вероятно, повлияет на величину всех расчетных параметров, в которых используется содержание ила в почве. Например, в чернозёмах обыкновенных карбонатных определением гранулометрического состава методом лазерной дифракции установлено, что на долю разницы между $0,001$ и $0,002$ мм приходится до $13,5$ %. Тем не менее, по нашему мнению, необходимо проведение специальных исследований с разными типами почв по детальному изучению этого вопроса.

Насколько важно адекватное установление границ между классами гранулометрических элементов, явствует из следующего примера. Границу между мелкой и средней пылью, установленную в $0,005$ мм, важно различать не только в генетическом почвоведении, но и в дорожном почвоведении, и в строительстве. Обусловлено это тем, что в более крупных фракциях свойства пластичности и липкости, а также способность к набуханию отсутствуют. Фракции размерностью ниже указанной границы обладают цементирующей способностью, что особенно важно в процессе структурообразования [13].

Различия в интерпретации данных по содержанию пыли рассмотрим на примере образца из горизонта В1 чернозёма обыкновенного карбонатного (табл. 5).

Зарубежные системы не разделяют пыль на более мелкие фракции, как это предусмотрено классификацией Н.А. Качинского. Однако если сравнить суммарное количество пыли, учтенное методом Качинского, – $86,89$ %, с содержанием пылеватых частиц по USDA – $82,40$ % и по WRB – $88,30$ %, то разница очевидна. Уменьшение количества пыли при определении по версии USDA происходит вследствие того, что из-за смещения границы ила на 1 мкм в сторону увеличения пылеватая часть теряет $4,49$ %, они попадают во фракцию ила.

Сравнивая количество пыли по Качинскому и WRB, следует отметить, что в международной классификации выход пыли больше, чем по классификации Качинского, – $88,30$ и $86,89$ соответственно, несмотря на то что часть пылеватых частиц ($0,001$ – $0,002$) перешла во фракцию ила. Это произошло за счет сдвига верхней границы общей пыли по версии WRB по сравнению с классификацией Качинского – $0,063$ против $0,05$ соответственно. Как следствие, все частицы размером $0,063$ – $0,05$ мм, которые по Качинскому относятся к мелкому песку, дополнили собой фракцию пыли, а это $5,90$ %.

Вследствие изменения границ основных текстурных классов, а соответственно, и изменения количества ЭПЧ, составляющих эти классы, при диагностировании приведенной в данном примере почвы гранулометрический состав оценивается как более тяжелый либо более легкий, в

зависимости от того, какой классификационной системой пользуется исследователь. Естественно, что разночтения в названии, не отражают реальное положение, так как в действительности количество ЭПЧ различных размеров в исследуемой почве не изменяется. На примерах, приведенных в табл. 4, 5, видно, что применение различных классификаций к одному и тому же почвенному образцу, иными словами, к одному и тому же относительному содержанию ЭПЧ, привело к смещению текстурного класса в сторону утяжеления при оценке по версии зарубежных классификаций.

Таблица 5 / Table 5

Гранулометрический состав почвы из горизонта В1 чернозёма обыкновенного карбонатного в контексте обсуждаемых классификаций / Particle-size distribution of the B1 horizon of ordinary carbonate chernozem in the context of the discussed classifications

Н.А. Качинский				USDA		WRB			
Фракция	Размер фракций ЭПЧ, мм	Содержание ЭПЧ, %	Фракция	Содержание ЭПЧ, %	Размер фракций ЭПЧ, мм	Содержание ЭПЧ, %	Размер фракций ЭПЧ, мм	Содержание ЭПЧ, %	Фракция
Ил	<0,001	2,26±0,18	Ил	2,26±0,18	<0,002	6,75±0,76	<0,002	6,75±0,76	Clay
Мелкая пыль	0,001–0,005	15,97±0,76	Пыль	86,89±5,93	0,002–0,05	82,40±5,37	0,002–0,063	88,30±2,71	Silt
Средняя пыль	0,005–0,01	15,74±2,78							
Крупная пыль	0,01–0,05	55,18±3,29							
Песок мелкий	0,05–0,25	10,86±1,11	Песок	10,86±6,06	0,05–0,1	10,83±6,04	0,063–0,125	4,95±3,31	Very fine sand
					0,1–0,25	0,03±0,02	0,125–0,20	0,00±0,00	Fine sand
	0,25–0,5	0,00±0,00			0,25–0,5	0,00±0,00	0,20–0,63	0,00±0,00	Medium sand
					0,5–1,00	0,00±0,00	0,63–1,25	0,00±0,00	Coarse sand
Гравий	1,00–3,00	0,00±0,00	Гравий	0,00±0,00	1,00–2,00	0,00±0,00	1,25–2,00	0,00±0,00	Very coarse sand
Почва по гранулометрическому составу									
Суглинок средний					Silt (пылеватая)				

Заключение

Отсутствие единых номенклатурных построений и методических подходов к классификациям ЭПЧ, общепринятых в научном сообществе, приводит к тому, что исследователи применяют различные методы и критерии для группировки механических элементов. При этом в классификациях, отличающихся между собой по принципиальным вопросам, часто используются одни и те же названия, что создает дополнительные трудности. Осложняется интерпретация в процессе работы над переводными статьями, поскольку под одним и тем же термином, например «пыль – silt», понимаются различные по размеру частицы, что, в свою очередь, приводит к затруднению применения международного опыта в отечественных исследованиях, а также может осложнять обзор публикаций в нашей сфере исследований.

Метод лазерной дифракции не связан ни с одной из сравниваемых классификаций, что позволяет использовать его в качестве независимого от сложившихся стереотипов. Преимуществом метода в подобного рода исследованиях является и то, что в нем предусмотрена возможность выставлять необходимые границы фракций, характерные для сравниваемых классификаций. Это

позволяет определять гранулометрический состав образца таким образом, что возможен дальнейший пофракционный сравнительный анализ количества входящих в них ЭПЧ.

Анализ полученных результатов показал, что вследствие изменения верхней границы ила в зарубежных классификациях по сравнению с классификацией Качинского происходит увеличение количества илистой фракции в первых – от 1,5 до 2 раз. Изменение границы ил – пыль вносит отличия и в содержание пыли.

Существующие разночтения в определении границ основных текстурных классов в классификациях Качинского, с одной стороны, и USDA, WRB – с другой, приводят к изменению количества ЭПЧ, составляющих эти классы, что сопровождается разногласиями в диагностике почвы по ее гранулометрическому составу. Это отражается в названии, тогда как реальное количество ЭПЧ различных размеров в образце не изменяется.

При определении текстурных классов почвы по Качинскому учет условий почвообразования обязателен, и как показали наши исследования, пренебрежение ими приводит к ошибкам в диагностике почвы по гранулометрическому составу.

Список источников

1. *Шейн Е.В.* Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций // Почвоведение. 2009. № 3. С. 309–317.
2. *Морозов И.В., Безуглова О.С.* Классификация элементарных почвенных частиц в разных школах почвоведения // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-2. С. 281–285.
3. *Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Yu.* From the Notion of Elementary Soil Particle to the Particle-Size and Microaggregate-Size Distribution Analyses: A Review // Eurasian Soil Science. 2018. № 51 (11). P. 1326–1347.
4. *Безуглова О.С.* Роль и значение классификационных построений в почвоведении // Междунар. журн. экспериментального образования. 2011. № 7. С. 20–22.
5. *Воронин А.Д.* Основы физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
6. *Дюшофур Ф.* Основы почвоведения. Эволюция почв. М.: Прогресс, 1970. 591 с.
7. *Ryżak M., Bieganski A.* Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser-diffraction method // J. of Plant Nutrition & Soil Science. 2011. № 174. P. 624–633.
8. Soil survey manual. Soil Survey Division Staff. United States Department of Agriculture. 2017. № 18. 120 p.
9. *Болдырева В.Э., Безуглова О.С., Морозов И.В.* К вопросу об определении гранулометрического состава почв с использованием метода лазерной дифракции // Науч. журн. Российского НИИ проблем мелиорации. 2019. № 1 (33). С. 184–194.
10. *Makó G.T., Weynants M., Rajkai K., Hermann T., Tóth B.* Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values, British Society of Soil Science // European J. of Soil Science. 2017. Vol. 68. P. 769–782.
11. *Хазарьян В.Э.* Сравнительный анализ методов пипетки и лазерной дифракции // Ломоносов-2013 : тез. докл. XX Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Москва, 8–12 апреля 2013 г. М.: МАКС Пресс, 2013. С. 218–219.
12. *Shein E.V., Milanovsky E.Yu., Molov A.Z.* The granulometric composition: the role of soil organic matter in data distinctions between sedimentation and laser diffraction analysis // Eurasian Soil Science. 2006. № 13(39). P. 84–90.
13. *Качинский Н.А.* Физика почв. М.: Высшая школа, 1965. Ч. 1. 324 с.
14. IUSS Working Group WRB: World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015 // World Soil Resources Reports. 106. Rome: FAO, 2015. 203 p.
15. *Шейн Е.В.* Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: метод. руководство. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2001. 200 с.
16. *Роуэл Д.Л.* Почвоведение: методы и использование. М.: Колос, 1998. 486 с.
17. *Juma N.G.* The Pedosphere and its Dynamics // A Systems Approach to Soil Science. Vol. 1: Introduction to soil science and soil science resources. Edmonton: Salman University of Alberta, 1999. 315 p.
18. *Вайчис М.В., Мажвила И.П.* Сравнительные исследования и оценка гранулометрического состава почв Литвы методами Н.А. Качинского и ФАО // Почвоведение. 2009. № 3. С. 318–324.
19. *Blott S.J., Pye K.* Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures // Sedimentology. 2012. № 59 (7). P. 2071–2096.
20. *Atterberg A.* Die mechanische Bodenanalyse und die Klassifikation der Mineralböden Schwedens // Int. Mitt. Bodenkd. 1912. № 2. S. 312–342.

21. Мельников П.Ф. Состав и свойства глинистой части некоторых почв и грунтов // Учен. записки Моск. ун-та. 1949. № 133. С. 58–60.
22. Кочерина Е.И. Некоторые химические и физические свойства отдельных механических фракций дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1954. № 12. С. 22–28.
23. Личманова А.И. Некоторые свойства механических фракций светло-серой лесной почвы // Почвоведение. 1962. № 6. С. 58–69.
24. Безрук В.М. Геология и грунтоведение : учебник. М.: Недра, 1977. 256 с.

References

1. Shein E.V. The particle-size distribution in soils: problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification. *Eurasian Soil Science*. 2009;42(3):284-291.
2. Morozov I.V., Bezuglova O.S. Classification of soil primary particles at different schools of soil science. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2011;(12-2):281-285. (In Russ.).
3. Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Yu. From the notion of primary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses. *Eurasian Soil Science*. 2018;(51):1326-1347.
4. Bezuglova O.S. The role and meaning of making classifications in soil science. *Mezhdunar. zhurn. eksperimental'nogo obrazovaniya = International Journal of Experimental Education*. 2011;(7):20-22. (In Russ.).
5. Voronin A.D. *Principles of soil physics*. Moscow: Moscow University Press; 1986. 244 p. (In Russ.).
6. Duchofour F. *Fundamentals of soil science. Evolution of soils*. Moscow: Progress Publ.; 1970. 591 p. (In Russ.).
7. Ryżak M., Bieganowski A. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser-diffraction method. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*. 2011;174:624-633.
8. Soil survey manual. Soil Survey Division Staff. United States Department of Agriculture. 2017;(18). 120 p.
9. Boldyreva V.E., Bezuglova O.S., Morozov I.V. To the issue of defining the soil texture by means of laser diffraction. *Nauch. zhurn. Rossiiskogo NII problem melioratsii = Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2019;(1):184-194. (In Russ.).
10. Makó G.T., Weynants M., Rajkai K., Hermannb T., Tóth B. Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values. *European J. of Soil Science*. 2017;68:769-782.
11. Khazaryan V.E. Comparative analysis of the pipette and laser diffraction methods. *Lomonosov-2013, Materials of 20th International Scientific Conference of Students, Postgraduates, and Young Researchers*. Moscow, April 8-12, 2013. Moscow: MAKS Press; 2013:218-219. (In Russ.).
12. Shein E.V., Milanovsky E.Yu., Molov A.Z. The granulometric composition: the role of soil organic matter in data distinctions between sedimentation and laser diffraction analysis. *Eurasian Soil Science*. 2006;(13):84-90.
13. Kachinskii N.A. *Soil physics*. Part 1. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1965. 324 p. (In Russ.).
14. IUSS Working Group WRB: World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. *World Soil Resources Reports. 106*. Rome: FAO; 2015. 203 p.
15. Shein E.V. *Field and laboratory methods of researching the physical properties and modes of soils: study guide*. Moscow: Moscow University Press; 2001. 200 p. (In Russ.).
16. Rowell D.L. *Soil science: methods and use*. Moscow: Kolos Publ.; 1998. 486 p. (In Russ.).
17. Juma N.G. The Pedosphere and its Dynamics. *A Systems Approach to Soil Science. Vol. 1: Introduction to soil science and soil science resources*. Edmonton: Salman University of Alberta; 1999. 315 p.
18. Vaicys M., Mazvila J. Comparative studies and assessment of the particle-size distribution in soils of lithuania by the Kachinskii and FAO methods. *Eurasian Soil Science*. 2009;42(3):292-298.
19. Blott S.J., Pye K. Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*. 2012;59(7):2071-2096.
20. Atterberg A. Mechanical analysis and classification of mineral soils in Sweden. *Int. Mitt. Bodenkd*. 1912;(2):312-342. (In Germ.).
21. Melnikov P.F. The content and properties of the clay part of some soils and grounds. *Uchen. zapiski Mosk. un-ta = Proceedings of Moscow University*. 1949;133:58-60. (In Russ.).
22. Kocherina E.I. The chemical and physical properties of some mechanical fractions of soddy - podzolic soil. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1954;(12):22-28. (In Russ.).
23. Lichmanova A.I. Some properties of the mechanical fractions of light-gray forest soil. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1962;(6):58-69. (In Russ.).
24. Bezrouk V.M. *Geology and soil science*. Textbook. Moscow: Nedra Publ.; 1977. 256 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ольга Степановна Безуглова – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Вероника Эдуардовна Болдырева – преподаватель, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Игорь Вадимович Морозов – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов.

Сулейман Самидинович Тагивердиев – кандидат биологических наук, научный сотрудник, научно-испытательная лаборатория биогеохимии.

Сергей Николаевич Горбов – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники, заведующий научно-испытательной лабораторией биогеохимии.

Information about the authors

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

Veronica E. Boldyreva - Lecturer, Department of Soil Science and Land Resources Assessment.

Igor V. Morozov - Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Associate Professor of Department of Soil Science and Land Resources Assessment.

Suleyman S. Tagiverdiev - Candidate of Science (Biology), Researcher, Laboratory of Biogeochemistry.

Sergey N. Gorbov - Doctor of Science (Biology), Professor, Head of the Department of Botany, Head of the Laboratory of Biogeochemistry.

Статья поступила в редакцию 27.03.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 27.03.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 16.05.2022.

Научная статья

УДК 551.582, 504.05 (477.75)

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-47-52

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ОПУСТЫНИВАНИЯ В КРЫМУ

Елена Ивановна Ергина^{1✉}, Владимир Олегович Жук²

^{1, 2} Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Республика Крым, Россия

² Средняя общеобразовательная школа № 12, Симферополь, Республика Крым, Россия

¹ ergina65@mail.ru[✉]

² zhuk_vladimir2015@mail.ru

Аннотация. Среди глобальных проблем человечества, требующих срочного комплексного решения, наряду с глобальным потеплением опустынивание занимает одно из ведущих мест. На данный момент по всему миру деградировано более 2 млрд га продуктивных земель, и ежегодно 12 млн га подвергаются процессу разрушения. Анализируется влияние современных процессов природного и антропогенного характера на состояние ландшафтов полуострова, которые могут привести к опустыниванию земель. Отмечается, что за последние 30 лет наблюдается устойчивая тенденция к повышению температуры воздуха практически на всей территории Крыма и увеличению количества выпадающих осадков. Статистически доказана активизация стихийных и опасных гидрометеорологических явлений на территории полуострова, что приводит к усилению процессов эрозии, дефляции, проявления засух. Впервые предложена методика оценки коэффициента потенциальной опасности опустынивания для территории Крымского полуострова.

Ключевые слова: потенциальная опасность опустынивания, Крымский полуостров

Для цитирования: Ергина Е.И., Жук В.О. Анализ и оценка процессов опустынивания в Крыму // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 47–52.

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

Original article

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF DESERTIFICATION PROCESSES IN THE CRIMEA

Elena I. Ergina^{1✉}, Vladimir O. Zhuk²

^{1, 2} V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

² Secondary Educational School No. 12, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

¹ ergina65@mail.ru[✉]

² zhuk_vladimir2015@mail.ru

Abstract. Among the global problems of humanity that require an urgent comprehensive solution, along with global warming, desertification occupies one of the leading places. At the moment, over 2 billion hectares of productive land worldwide are degraded, and annually 12 million hectares are subject to the process of destruction.

The article analyzes the influence of modern natural and anthropogenic processes on the state of the landscapes of the peninsula, which can lead to land desertification. It is noted that over the past 30 years there has been a steady upward trend in air temperature deviations from the norm in almost the entire territory of Crimea and an increase for precipitation. The activation of natural and dangerous hydrometeorological phenomena on the territory of the peninsula has been statistically proven, which leads to the activation of the processes of erosion, deflation, and manifestations of droughts. For the first time, a methodology for assessing the coefficient of potential danger of desertification for the territory of the Crimean peninsula has been proposed.

© Ергина Е.И., Жук В.О., 2022

Keywords: *potential danger of desertification, Crimean peninsula*

For citation: Ergina E.I., Zhuk V.O. Analysis and Assessment of Desertification Processes in the Crimea. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):47-52. (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

Среди глобальных проблем человечества, требующих срочного комплексного решения, наряду с глобальным потеплением опустынивание занимает одно из ведущих мест. Согласно данным ООН, засушливые земли занимают 30 % земной поверхности в более 100 странах мира, где проживает около 2 млрд чел. [1]. Изучение этого процесса, создание сети мониторинга и в дальнейшем разработка мероприятий по его предотвращению относятся к приоритетным направлениям современной мировой науки. Конвенция ООН по борьбе с опустыниванием определяет опустынивание как «деградацию земель в засушливых, ползасушливых и сухих субгумидных районах в результате действия различных факторов, включая вариации климата и деятельность человека» [1]. Климатические изменения, особенно экстремальные, являются пусковым механизмом опустынивания как в России, так и во всем мире. За прошедший 20-летний период наблюдается заметное увеличение площадей деградированных и пустынных земель почти во всех аридных регионах, особенно в Африке и Евразии, в состав которой входит и территория нашей страны [2].

В Российской Федерации опустынивание получило развитие в равнинных районах семиаридной, сухой, субгумидной зоны [2–5], где в той или иной мере этими процессами охвачено 27 субъектов на площади более 100 млн га. Среди главных причин опустынивания на территории нашей страны назовем следующие: нерациональное использование природных ресурсов, превышающее порог экологической устойчивости природных экосистем, за которым следует их разрушение, на фоне аридизации климата; необратимое потребление природных ресурсов без заботы об их воспроизводстве. Очевидно, что сокращение и разрушение биологического потенциала земель являются сутью процесса опустынивания, в результате которого создаются условия, благоприятствующие формированию ландшафтов, близких к пустынным [6]. В ландшафтах, которые подвержены опустыниванию, ухудшаются физические особенности почв, гибнет растительность и, как следствие, уменьшается способность экосистем к восстановлению. В современном понимании нет причин считать опустынивание земель чисто природным или антропогенным процессом.

На территории Крымского полуострова в последние годы реализуются несколько элементарных пустынеобразующих процессов (ЭПОП) [7]: эрозия, засоление почв, климатические изменения [8–10]. В связи с этим целью нашей работы стал территориальный анализ и оценка основных ЭПОП, влияющих на развитие и усиление процессов опустынивания на полуострове.

Обсуждение результатов

В большинстве работ регионального характера основу оценки процессов опустынивания составляют методики оценки климатических изменений, чаще всего количества осадков, за определенный промежуток времени (отклонения от нормы). В наших исследованиях учитываются и другие факторы, прямо и косвенно характеризующие проявление процессов опустынивания: отклонение средней суммы осадков от нормы; число опасных гидрометеорологических явлений (засухи, суховеи, пыльные бури); урожайность сельскохозяйственных культур, эродированность почв сельскохозяйственных угодий в разрезе муниципальных образований Республики Крым.

Для количественной характеристики проявления процессов опустынивания предлагаем применять коэффициент потенциальной опасности опустынивания (K_o), который рассчитывается по формуле:

$$K_o = \frac{(R+Y)-(Z+P+S+E)}{100\%} \cdot (\text{ГТК}), \quad (1)$$

где K_0 – коэффициент потенциальной опасности опустынивания; R – отклонение средней суммы осадков за период 2010–2015 гг. от 30-летнего тренда, %; Z – вероятность проявления засухи, %; P – вероятность проявления пыльной бури, %; S – вероятность проявления засуховая, %; Y – средняя урожайность зерновых за период 2010–2015 гг. от максимального сбора в год, %; ГТК – гидротермический индекс; E – доля с/х земель, подверженных эрозии, %.

Индекс ГТК рассчитывался как характеристика уровня влагообеспеченности территории:

$$\text{ГТК} = \sum(r_{>10}) / (0,1t_{>10}), \quad (2)$$

где $r_{>10}$ – сумма осадков за период с температурами выше +10 °С, мм; $t_{>10}$ – сумма температур за то же время, °С.

Фактическими материалами для оценки потенциальной опасности опустынивания земель в Крыму послужили данные Крымского гидрометцентра за 2010–2015 гг., справочная агроклиматическая литература по республике [11], данные Управления Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю и Министерства сельского хозяйства Крыма [12].

При выборке факторов для расчета K_0 с помощью кластерного анализа определяются ключевые параметры, которые в большей степени влияют на опустынивание территории. Результаты иерархической классификации представлены в виде горизонтальной дендрограммы (рис. 1).

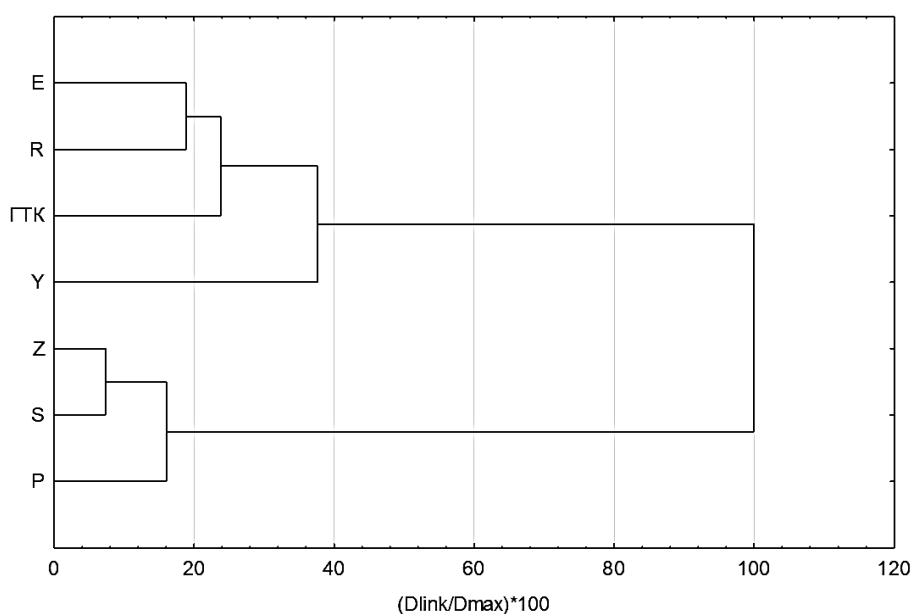


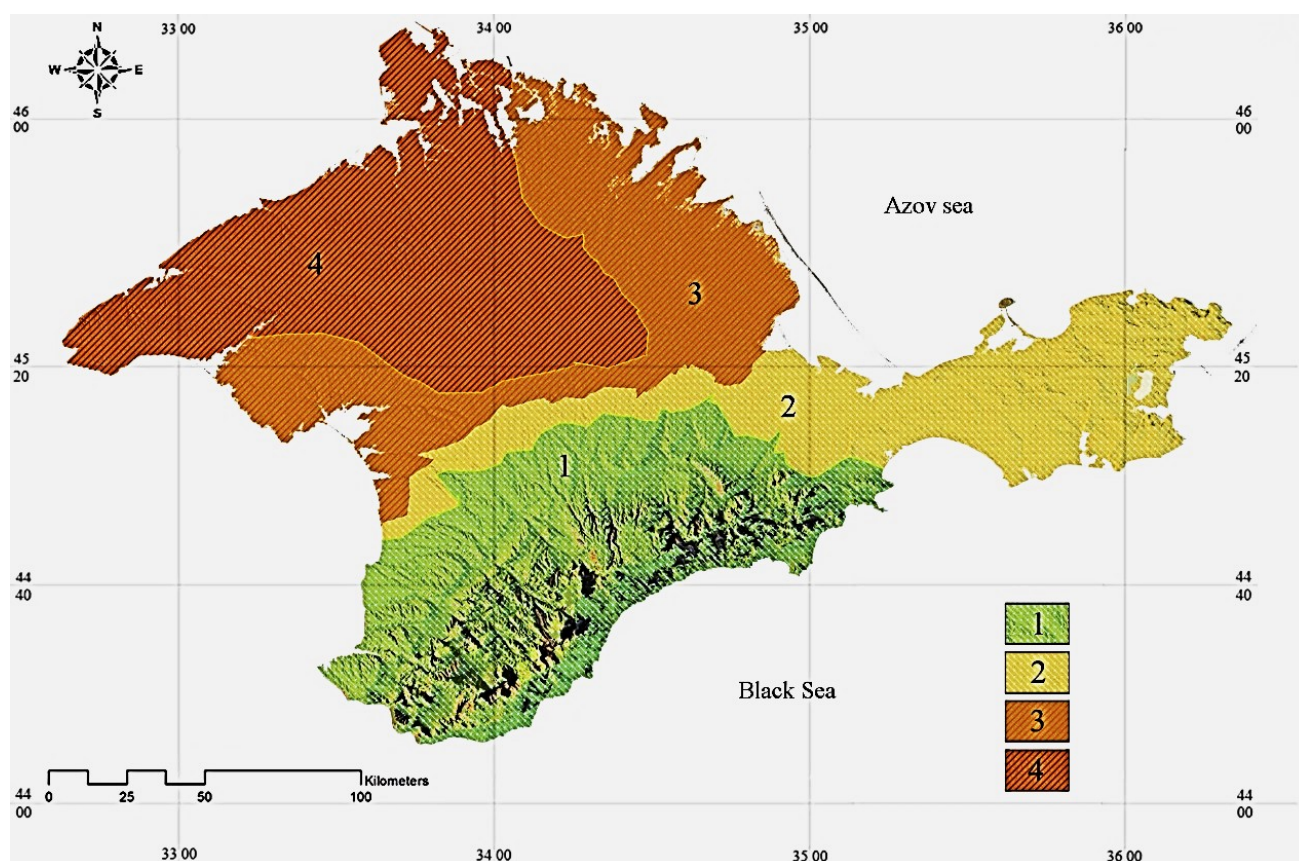
Рис. 1. Дендрограмма факторов опустынивания / Fig. 1. Desertification factors dendrogram

Результаты расчетов K_0 представлены в таблице. Исходя из значений рассчитанного коэффициента, логично предположить, что чем ниже K_0 , тем опасность опустынивания больше, что позволяет провести ранжирование показателя. При K_0 в пределах 0,4–0,8 вероятность опустынивания очень высокая; 0,9–1,2 – высокая; 1,3–1,6 – средняя; 1,7–2,2 – низкая. Картирование K_0 позволяет провести количественную и качественную оценку проявления процессов опустынивания в пространстве Крымского полуострова. Геоинформационное моделирование мы проводили с использованием геоинформационной картографической системы Quantum-Gis 1.7.4 (рис. 2).

Полученные данные о потенциальной опасности опустынивания территории Крымского полуострова (рис. 2) свидетельствуют о том, что более всего опустыниванию подвержены земли в Северо-Западном Крыму и в центральной части равнинного Крыма, где наблюдается очень высокая потенциальная опасность опустынивания. Это обусловлено тем фактом, что наряду с увеличением засушливых периодов в данных районах отмечается действие более сильных ветров, которые ускоряют процессы пересыхания почвы и развития процессов дефляции. Средняя годовая скорость ветра в Западном и Северо-Западном Крыму больше, чем в других районах Крыма [8, 9].

**Факторы и потенциальная опасность опустынивания по районам Крымского полуострова
 / Factors and potential danger of desertification in the regions of the Crimean peninsula**

Район	Е	У	Р	З	Р	С	ГТК	К _о
Бахчисарайский	79,2	87,0	110,0	4,7	0,0	1,9	1,9	2,1
Белогорский	83,3	91,0	117,0	4,7	0,0	1,9	1,7	2,0
Джанкойский	56,7	96,0	110,0	7,0	10,0	7,8	0,9	1,0
Кировский	44,0	96,0	86,0	4,7	5,0	3,9	1,5	1,8
Красногвардейский	61,1	73,0	95,0	8,2	10,0	11,7	0,7	0,4
Красноперекопский	48,3	72,0	78,0	8,2	10,0	11,7	0,7	0,4
Ленинский	51,2	73,0	117,0	5,9	5,0	5,9	1,3	1,5
Нижнегорский	31,0	96,0	90,0	8,2	10,0	9,8	0,9	1,0
Первомайский	37,6	85,0	90,0	8,2	10,0	11,8	0,7	0,6
Раздольненский	70,9	69,0	118,0	7,0	10,0	9,8	0,9	0,7
Сакский	70,2	92,0	105,0	5,9	5,0	5,9	1,3	1,3
Симферопольский	73,5	65,0	107,0	4,7	10,0	3,9	1,7	1,3
Советский	54,3	71,0	105,0	5,9	5,0	5,9	1,3	1,3
Черноморский	82,7	82,0	110,0	7,0	10,0	7,8	1,1	0,8
Ялтинский г.с.	90,0	97,0	115,0	4,7	0,0	0,0	1,9	2,2
Севастопольский г.с.	80,0	96,0	105,0	4,7	0,0	0,0	1,9	2,2



Условные обозначения: потенциальная опасность опустынивания:
 1 – низкая; 2 – средняя; 3 – высокая; 4 – очень высокая

Рис. 2. Зонирование территории Крымского полуострова по степени потенциальной опасности опустынивания земель / Fig. 2. Zoning of the territory of the Crimean peninsula according to the degree of potential danger of land desertification

Высокая степень потенциальной опасности опустынивания наблюдается в Западном Крыму и в Северном Присивашье. На территории Керченского полуострова и в северо-восточной части равнинного Крыма опасность опустынивания средней степени, в предгорном и горном Крыму – низкая.

Выводы

В результате исследований выделены зоны с очень высокой, высокой, средней и низкой опасностью проявления процессов опустынивания на территории Крымского полуострова. Количественной мерой проявления этого процесса стал расчет коэффициента потенциальной опасности опустынивания.

Полученные данные о потенциальной опасности опустынивания территории Крымского полуострова свидетельствуют о том, что быстрее всего процессы опустынивания развиваются в Северо-Западном Крыму (Черноморский, Раздольненский, Первомайский районы) и в центральной части равнинного Крыма (Красногвардейский район), где наблюдается очень высокая потенциальная опасность опустынивания. Высокая степень развития процессов опустынивания отмечается в Северном Присивашье (Джанкойский, Нижнегорский районы).

На территории Керченского полуострова, в предгорном Крыму (Симферопольский район) и в северо-восточной части равнинного Крыма (Советский район) – средняя потенциальная опасность опустынивания.

Менее всего процессы опустынивания развиваются в горных районах и на Южном берегу Крыма.

Список источников

1. Конвенция Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием в тех странах, которые испытывают серьезную засуху и/или опустынивание. 1994. UN General Assembly. A/AC.241/27. URL: <http://www.unccd.int/fr/programmes/RioConventions/Pages/Rio-PLUS-20-.aspx> (дата обращения: 05.02.2022).
2. Залибеков З.Г. Аридные земли мира и их динамика в условиях современного климатического потепления // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17, № 1 (46). С. 5–13.
3. Безуглова О.С., Голозубов О.М., Полюян Д.И. Региональные особенности процессов опустынивания в Ростовской области // Аридные экосистемы. 2015. Т. 21, № 1 (62). С. 17–21.
4. Золотокрылин А.Н. Засухи и опустынивание в суббореальных ландшафтах России // Изв. РАН. Серия геогр. 2013. № 5. С. 64–73.
5. Куст Г.С., Глазовский Н.Ф., Андреева О.В., Шевченко Б.П., Добрынин Д.В. Основные результаты по оценке и картографированию опустынивания в Российской Федерации // Аридные экосистемы. 2002. Т. 8, № 16. С. 7–27.
6. Розанов Б.Г. Живой покров Земли. М.: Педагогика, 1989. 128 с.
7. Светличный А.А., Черный С.Г., Швец Г.И. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты. Сумы: Университетская книга, 2004. 410 с.
8. Ергина Е.И., Горбунов Р.В., Щербина А.Д. Географический анализ допустимых норм эрозии почв в агроландшафтах Крымского полуострова. Симферополь : Ариал, 2018. 180 с.
9. Жук В.О., Ергина Е.И. Тенденции и динамика опасных и стихийных гидрометеорологических явлений в Крыму // Учен. записки Крымского фед. ун-та им. В.И. Вернадского. География. Геология. 2016. Т. 2 (68), № 2. С. 73–86.
10. Ergina E.I., Zhuk V.O. Spatiotemporal Variability of the Climate and Dangerous Hydrometeorological Phenomena on the Crimean Peninsula // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. Vol. 44, iss. 7. P. 494–500.
11. Агроклиматический справочник по АР Крым / под ред. О.И. Прудко, Т.И. Адаменко. Симферополь : Таврида, 2011. 342 с.
12. Республика Крым: средняя урожайность зерновых // Ассоциация крестьянских (фермерских) хозяйств и сельскохозяйственных кооперативов России. URL: <https://www.akkor.ru/statya/5148-respublika-krym-srednyaya-urozhaynost-zernovyh-upala.html> (дата обращения: 05.02.2022).

References

1. *United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification*. 1994. UN General Assembly. A/AC.241/27. Available from: <http://www.unccd.int/fr/programmes/RioConventions/Pages/Rio-PLUS-20-.aspx> [Accessed 5th February 2022]. (In Russ.).

2. Zalibekov Z.G. Arid lands of the world and their dynamics in the conditions of modern climatic warming. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2011;17(1);5-13. (In Russ.).
3. Bezuglova O.S., Golozubov O.M., Poluyan D.I. Regional features of desertification processes in the Rostov region. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2015;21(1);17-21. (In Russ.).
4. Zolotokrylin A.N. Droughts and desertification in subboreal landscapes of Russia. *Izv. RAN. Geogr. = Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2013;(5):64-73. (In Russ.).
5. Kust G.S., Glazovsky N.F., Andreeva O.V., Shevchenko B.P., Dobrynin D.V. Main results on assessment and mapping of desertification in the Russian Federation. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2002;8(16):7-27. (In Russ.).
6. Rozanov B.G. *The living cover of the Earth*. Moscow: Pedagogika Publ.; 1989. 128 p. (In Russ.).
7. Svetlichny A.A., Cherny S.G., Shwebs G.I. *Erosion studies: theoretical and applied aspects*. Sumy: Universitetskaya kniga Publ.; 2004. 410 p. (In Russ.).
8. Yergina E.I., Gorbunov R.V., Shcherbina A.D. *Geographical analysis of permissible norms of soil erosion in agricultural landscapes of the Crimean peninsula*. Simferopol: Arial Publ.; 2018. 180 p. (In Russ.).
9. Zhuk V.O., Yergina E.I. Trends and dynamics of dangerous and natural hydrometeorological phenomena in the Crimea. *Uchen. zapiski Krymskogo fed. un-ta im. V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya = Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2016;2(2):73-86. (In Russ.).
10. Ergina E.I., Zhuk V.O. Spatiotemporal Variability of the Climate and Dangerous Hydrometeorological Phenomena on the Crimean Peninsula. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019;44(7):494-500.
11. Prudko O.I., Adamenko T.I., eds. *Agro-climatic handbook of the Autonomous Republic of Crimea*. Simferopol: Tavrida Publ.; 2011. 342 p. (In Russ.).
12. The Republic of Crimea: average grain yield. *Association of peasant (farmer) farms and agricultural cooperatives of Russia*. Available from: <https://www.akkor.ru/statya/5148-respublika-krym-srednyaya-urozhaynost-zernovyh-upala.html> [Accessed 5th February 2022]. (In Russ.).

Информация об авторах

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

В.О. Жук – учитель географии.

Information about the authors

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

V.O. Zhuk – Geography Teacher.

*Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 04.04.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 16.05.2022.*

Научная статья

УДК 796.5

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-53-61

ДИНАМИКА ВЪЕЗДНОГО МЕЖДУНАРОДНОГО ТУРИЗМА В ОСНОВНЫХ ТУРИСТИЧЕСКИХ РЕГИОНАХ КИТАЯ

Ольга Васильевна Ивлиева^{1✉}, Ма Цзя², Лю Чэнь³

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

¹ivlieva.o@mail.ru✉

²364530437@qq.com

³19030884@qq.com

Аннотация. Международный туризм служит важным механизмом социально-экономического развития страны, обеспечивает устойчивый приток иностранной валюты, инвестиций, развитие многих смежных отраслей. С 1978 г. рынок въездного туризма Китая показывает стабильную и быструю тенденцию развития. Период активного роста въездного туризма Китая начался с 1986 г. Более 55 млн путешественников со всего мира посещают Китай ежегодно. В настоящее время туристическая индустрия страны вступила в стадию быстрого развития, стала важным промышленным сектором национальной экономики. Комплексный вклад туризма в ВВП Китая достиг примерно 11 %. Общее количество прямых и косвенных рабочих мест в сфере туризма в настоящее время составляет 10,3 % от общего числа занятого населения страны. Сегодня Китай занимает пятое-шестое места в мире в рейтинге валютных поступлений в доход страны от туризма. Восток, Юг, Юго-Запад и Центр Китая имеют наивысший демографический потенциал и объём средств размещения для развития туризма. Сеть регулярного и высокоскоростного железнодорожного полотна в Китае распространена в этих регионах страны. Среди стран-доноров для туристов лидируют Южная Корея, Япония, США и Россия. Ежегодно Китай принимает около 5 млн туристов из Южной Кореи. Европа и Америка, имеющие высокий ВВП на душу населения, обеспечивают также большой вклад. Среди 31 провинциального района Китая наибольшее количество прибывающих туристов, более 3 млн чел., отмечается в Пекине, Ляонине, Шанхае, Цзянсу, Чжэцзяне, Шаньдуне и Гуандуне, которые находятся в экономически развитых провинциях и прибрежных районах восточной и южной частях страны. В настоящее время индустрия туризма развивается стабильно, рынок въездного туризма продолжает расти высокими темпами.

Ключевые слова: въездной туризм, дестинация, туристический продукт, туристическая индустрия

Для цитирования: Ивлиева О.В., Ма Цзя, Лю Чэнь. Динамика въездного международного туризма в основных туристических регионах Китая // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 53–61.

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

Original article

DYNAMICS OF INBOUND INTERNATIONAL TOURISM IN THE MAIN TOURIST REGIONS OF CHINA

Olga V. Ivlieva^{1✉}, Ma Jia², Liu Chen³

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

¹ivlieva.o@mail.ru✉

²364530437@qq.com

³19030884@qq.com

© Ивлиева О.В., Ма Цзя, Лю Чэнь, 2022

Abstract. *International tourism serves as an important mechanism for the socio-economic development of the country, provides a steady inflow of foreign hard currency, investment and the development of many related industries. Since 1978, China's inbound tourism market has maintained a stable and rapid development trend. The period of rapid growth of inbound tourism in China began in 1986. More than 55 million travelers from all over the world visit China every year. At present, China's tourism industry has entered the stage of rapid development and has become an important industrial sector of the national economy. The comprehensive contribution of tourism to China's GDP has reached about 11 %. The total number of direct and indirect jobs in the tourism industry now accounts for 10.3 % of the country's total employed population. Today, China ranks fifth to sixth in the world in foreign exchange earnings from tourism. China's East, South, Southwest and Center have the highest demographic and accommodation capacity for tourism development. China's regular and high-speed rail network is also confined to these regions of the country. South Korea, Japan, the USA and Russia are among the leading inbound tourist donor countries. China annually receives about 5 million tourists from South Korea. Europe and America, which have high GDP per capita, also provide a large flow of tourists. Among the thirty-one provincial areas in China, Beijing, Liaoning, Shanghai, Jiangsu, Zhejiang, Shandong and Guangdong, which are located in the economically developed provinces and coastal areas in the east and south, have the most tourist arrivals, more than 3 million. Currently, the tourism industry in China is developing steadily, the inbound tourism market continues to grow at a high pace.*

Keywords: *inbound tourism, destination, tourist product, tourism industry*

For citation: Ivlieva O.V., Ma Jia, Liu Chen. Dynamics of Inbound International Tourism in the Main Tourist Regions of China. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):53-61. (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

Международный туризм как форма мирохозяйственных связей становится все более объемной и диверсифицированной сферой мировой экономики. Туризм служит важным механизмом социально-экономического развития как для индустриальных, так и многих развивающихся стран, а также для отдельных регионов, обеспечивая устойчивый приток в них иностранной твердой валюты, инвестиций, развитие многих смежных отраслей. Становление современного рынка туристических услуг помогает стране более эффективно решать задачи сокращения безработицы и расширения сопутствующих производств.

За последнее десятилетие Азиатско-Тихоокеанский регион стал самой быстрорастущей туристической территорией мира. Туризм стал одной из наиболее важных сфер экономики в большом количестве стран этого региона. Совокупность природно-климатических, экономических, цивилизационных и культурных факторов способствует растущей привлекательности Китая как туристического центра.

С углублением реформ, устойчивым экономическим ростом Китая и увеличением национального дохода туристическая индустрия Китая вступила в стадию быстрого развития, а также стала важным промышленным сектором национальной экономики.

Материалы и методы

По данным отчета конкурентоспособности туризма, составленного аналитиками Всемирного экономического форума (ВЭФ), Китай поднялся в рейтинге с 69-го места в 2009 г. до 13-го в 2019 г. [1, 2] и стал занимать важное место в мировом туризме (рис. 1).

На современном этапе сфера туризма стала одной из основных отраслей экономики Китая. Индустрия туризма влияет и на другие отрасли хозяйства, которые могут быть интегрированы с туризмом, такие как технологии, культура и спорт. В 2019 г. комплексный вклад туризма в ВВП достиг 10,94 трлн юаней, составляя примерно 11 % от общего ВВП Китая, в то время как уровень вклада развитых стран находится в пределах 5–9 % (рис. 2) [3].

Индустрия туризма создает год от года все больше рабочих мест. В 2019 г. 28,3 млн человек были заняты в этой области напрямую и 51,6 млн человек – косвенно. Общее количество рабочих мест в сфере туризма составило 10,3 % от общего числа занятого населения страны [4].

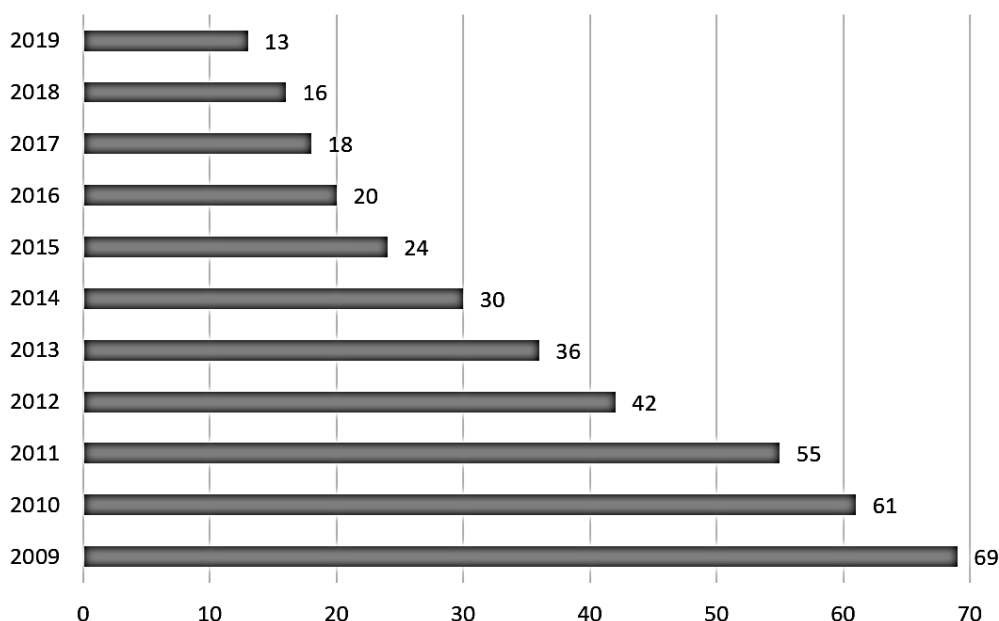


Рис. 1. Динамика рейтинга туристической отрасли КНР в мире в 2009–2019 гг.
 / Fig. 1. Dynamics of the ranking of the Chinese tourism industry in the world in 2009-2019 [2]

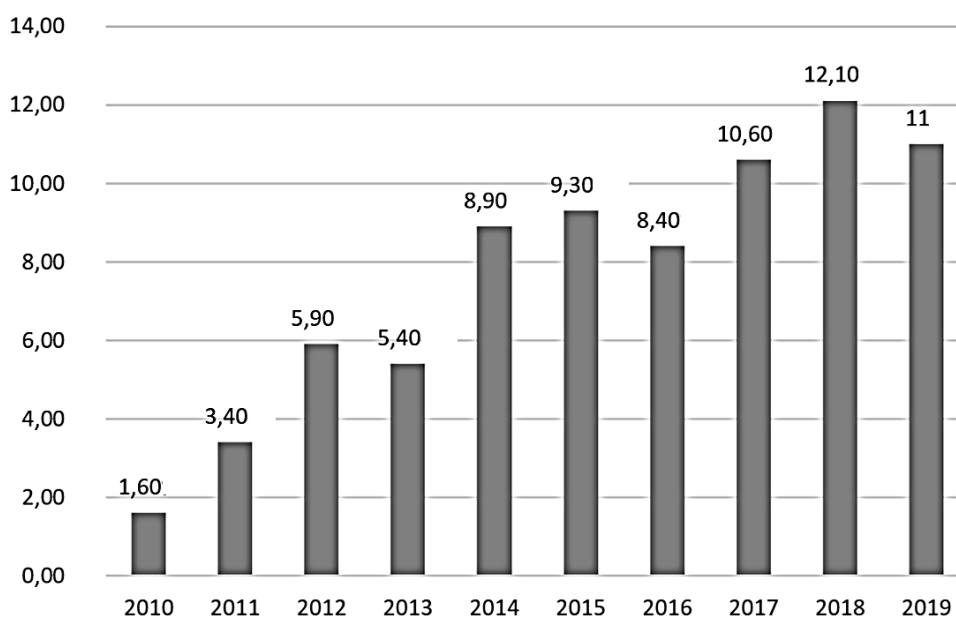


Рис. 2. Динамика доли туризма в ВВП Китая в 2009–2019 гг., %
 / Fig. 2. Dynamics of tourism share in China's GDP in 2009-2019, % [3]

Согласно статистике, опубликованной Бюро статистики и Министерством культуры и туризма, в 2018 г. было зарегистрировано 47,95 млн въездных иностранных туристов (включая туристов из соседних стран). В период 2008–2019 гг. рейтинг международных туристических поездок в Китай оставался стабильным. По данным Всемирной туристской организации, в 2018 г. въездной туризм Китая занял четвертое место в мире после Франции, Испании и США [5]. Доход от международного туризма достиг 127,103 млрд долл. США. Сегодня Китай занимает пятое-шестое места в мире в рейтинге валютных поступлений в доход страны от туризма.

Чтобы понять причины быстрого развития туристической отрасли Китая, необходимо проанализировать процесс её развития и эволюции в различные периоды политического руководства и промышленных изменений.

Развитие въездного туризма Китая может быть условно разделено на три периода [6]. На первом этапе (1949–1977 гг.) туризм использовался в качестве дипломатического средства с сильной политической окраской, с целью содействия дружескому обмену и модернизации экономики. Развитие туризма стало способом углубления дипломатических отношений и стремления к национальной дружбе. В этот период он не являлся экономической отраслью.

Период запуска международного туристического рынка состоялся в Китае в восьмидесятые годы (1978–1980 гг.). Первым результатом стал открытый доступ в Китай для людей со всего мира. Однако туризм в это время считался частью работы по иностранным делам и не рассматривался как экономическая отрасль.

Период быстрого роста на международном туристическом рынке начался с 1986 г., когда Китай полностью вступил в стадию развития туризма с экономическим приоритетом. После ряда лет устойчивого роста въездного туризма мировые рейтинги Китая взлетели, и Китай стал мировой туристической державой.

Для выполнения сравнительного анализа туристической инфраструктуры регионов Китая, исходя из регионально-географической принадлежности провинций и городов провинциального уровня, выделено семь кластеров-регионов [7] (рис. 3).

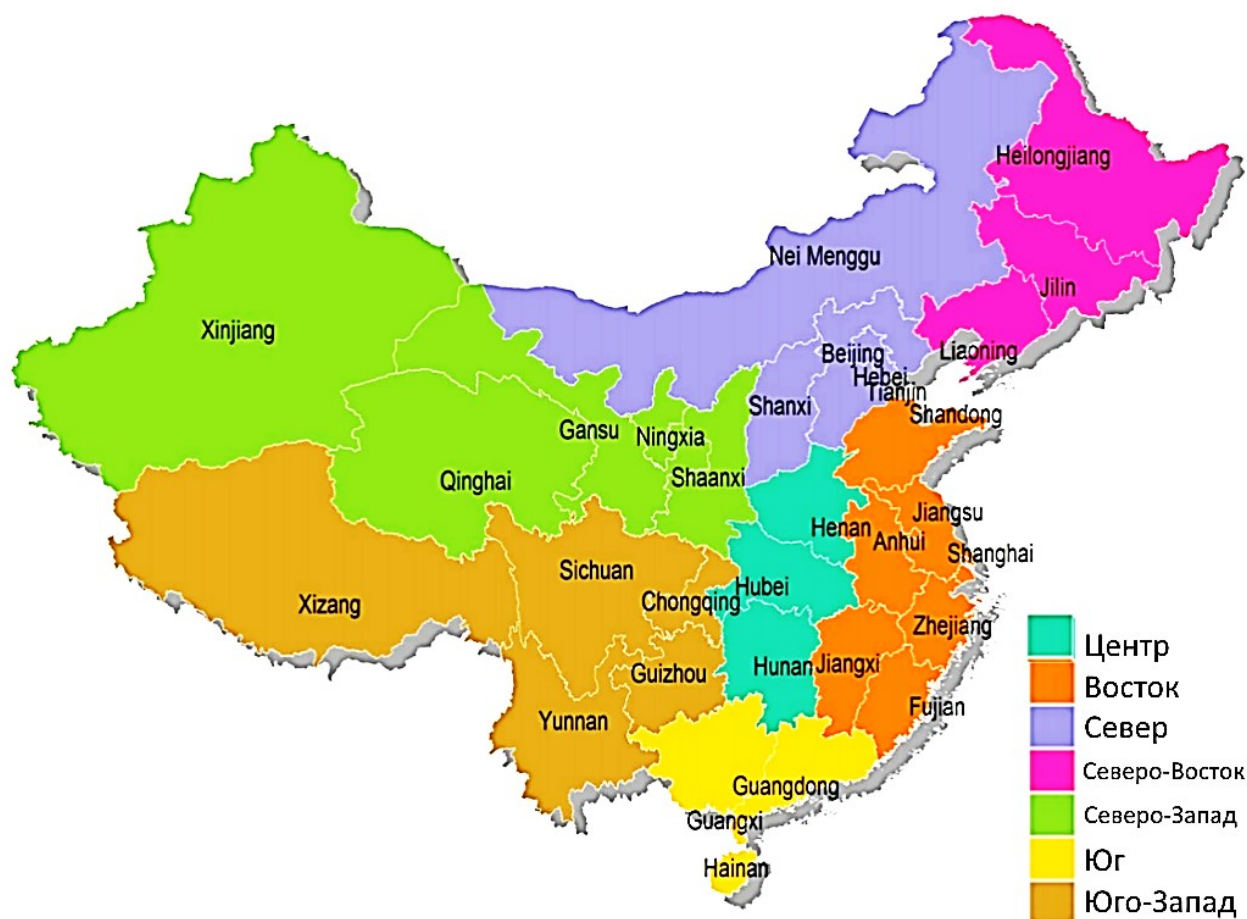


Рис. 3. Региональное деление провинций Китайской Народной Республики
/ Fig. 3. Regional division of the provinces of the People's Republic of China

Каждый регион имеет свой историко-культурный потенциал развития туристической отрасли, вместе с этим демографический фактор (численность населения) является драйвером для развития туризма и смежных отраслей в них. Кластеры Восток, Юг, Юго-Запад и Центр, приближенные к торговым путям, имеют наивысший демографический потенциал, в то время как кластер Северо-Запад – наименьший.

Значительную роль в развитии туризма играет современное состояние гостиничной отрасли. По общему числу средств размещения в семи туристических кластерах Китайской Народной Республики (табл. 1) лидируют Южный Китай и Восточный Китай – 4520 и 4120 отелей соответственно, в то время как явным аутсайдером по данному показателю является Юго-Западный Китай – 1624 отеля. Это, в частности, связано с неравенством доходов и возможностей между провинциями данного региона и остальным Китаем, а также с особенностями ландшафтов, а именно горными массивами и недостаточно развитой транспортной инфраструктурой, а также демографическими и иными социально-экономическими показателями.

Таблица 1 / Table 1

Состояние гостиничной отрасли в регионах Китая [8]
/ The state of the hotel industry in the regions of China [8]

Показатель деятельности отелей	Основные туристические регионы Китая							
	Центр	Восток	Север	Северо-Восток	Северо-Запад	Юг	Юго-Запад	Итого
Количество отелей	2 980	4 120	2 548	2 450	1 430	4 520	1 624	19 672
Все средства размещения	3 020	2 290	3 255	2 660	1 422	4 123	1 627	18 397
Занятость (>10 000 человек)	28,00	36,30	28,12	22,97	12,28	35,60	14,05	177,32
Доходы от бизнеса (>100 млн юаней)	650	451	641	524	280	812	321	3 678
Доходы от гостиничных номеров (>100 млн юаней)	305	237	336	275	147	426	168	1 894
Доходы от питания (>100 млн юаней)	210	156	222	182	97	282	111	1 260
Количество номеров (>10 000 номеров)	65,00	43,87	62,34	54,78	27,23	78,96	31,17	363,34
Количество коек (>10 000 коек)	93,00	70,81	100,63	82,23	43,95	127,46	50,31	568,39

Большое влияние на развитие туристической отрасли играет транспортное обеспечение основных туристических регионов. Сеть регулярного и высокоскоростного железнодорожного полотна в Китае показывает четкое разделение территории страны на два региона: Восток и Запад (рис. 4).

Если условно провести линию вертикальной симметрии, можно обнаружить, что железнодорожные магистрали, позволяющие развивать скорость до 300 км/ч, расположены на Востоке, и ни одной высокоскоростной магистрали нет в Западном Китае. Именно данный вид железнодорожного транспорта значительно ускоряет перемещение туристов и увеличивает туристический поток в регион.

Страны – доноры въездного международного туризма в основном имеют географически близкое местоположение к Китаю (табл. 2). Среди них сохраняется лидерство Южной Кореи, что связано с географической близостью, тесным сотрудничеством предпринимателей из Китая и Южной Кореи, а также высоким уровнем дохода корейских граждан. Ежегодно Китай принимает около 5 млн туристов из этой страны. На втором месте после Южной Кореи по количеству туристов следует Япония, откуда до пандемии приезжали около 3 млн чел., хотя количество туристов в последнее время сокращается. Это может быть связано в основном с напряженностью в отношениях между Китаем и Японией в последние годы. Третье и четвертое место принадлежат США и России, которые обеспечивают приток туристов из своих стран на уровне 2,5–2,7 млн чел. в год. Малайзия, Сингапур, Монголия и другие соседние страны также входят в число основных стран – источников туристов в Китай (табл. 2).

Европа и Америка не являются основными туристическими направлениями для въездного туризма Китая из-за большого расстояния, исторической культуры, образа жизни и различий в цен-

ностях. Тем не менее эти страны имеют высокий ВВП на душу населения и обеспечивают большой поток туристов. Австралия, Новая Зеландия и Океания являются важными объектами обмена туристами с Китаем, причем в двустороннем порядке.

Число иностранных туристов, въезжающих с целью осмотра достопримечательностей и отдыха, составляет около половины от общего числа иностранных туристов. Конгрессный и выставочный туризм занимает второе место, доля лиц, посещающих родственников и друзей, невелика [9].

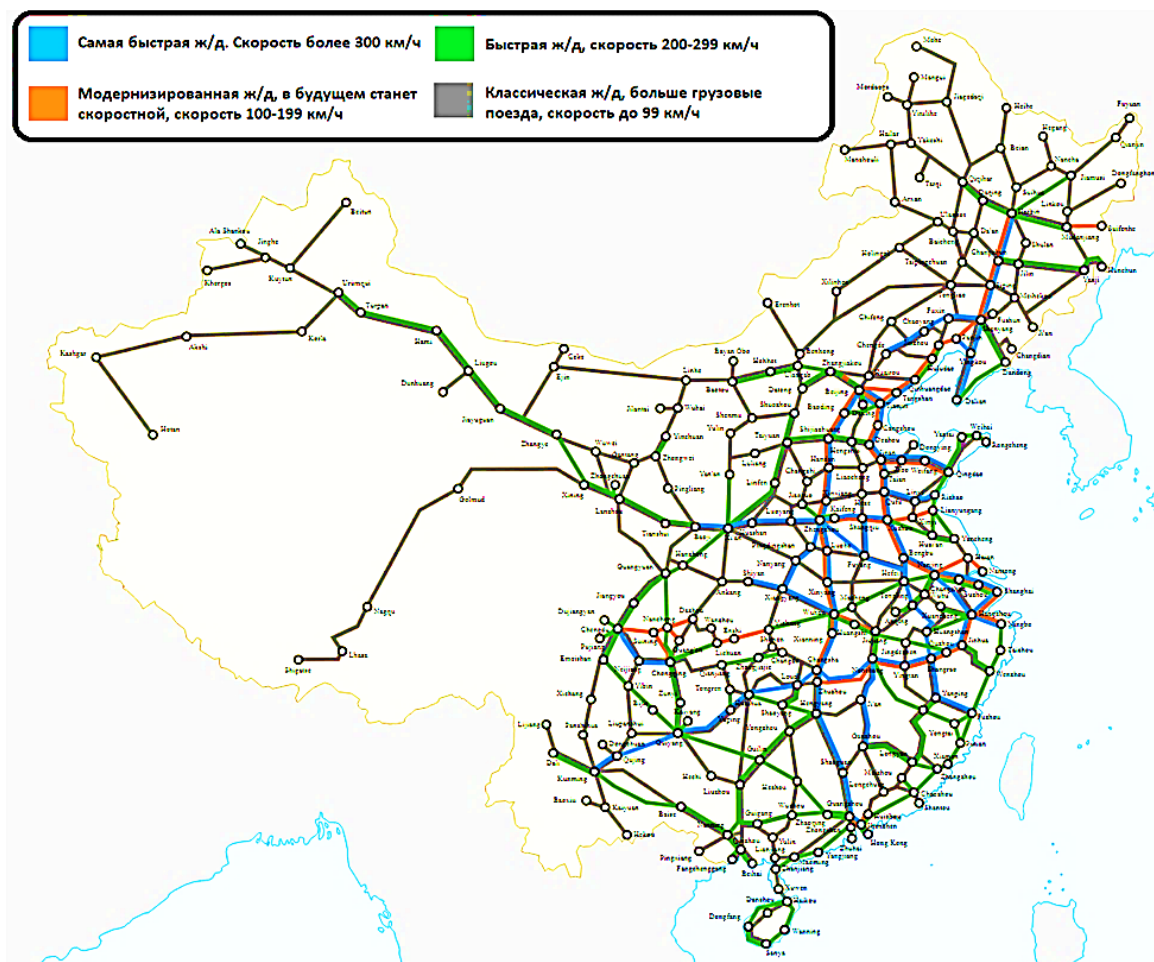


Рис. 4. Схема железнодорожной сети Китая, февраль 2021 г.
 / Fig. 4. Scheme of China's railway network, February 2021

Таблица 2 / Table 2

Основные международные туристические потоки в Китай, млн чел. [9]
 / **Main international tourist arrivals to China, million people [9]**

Рейтинг	2009		2019	
	Страна	Турпоток, млн чел.	Страна	Турпоток, млн чел.
1	Южная Корея	3,96	Южная Корея	4,19
2	Япония	3,45	Япония	2,70
3	Россия	3,12	США	2,49
4	США	1,79	Россия	2,42
5	Малайзия	1,04	Монголия	1,49
6	Сингапур	0,88	Малайзия	1,29
7	Филиппины	0,80	Филиппины	1,21
8	Вьетнам	0,74	Сингапур	9,78
9	Монголия	0,71	Индия	8,63
10	Австралия	0,57	Канада	8,50

В первой десятке рейтинга популярности въездного туризма в 2019 г. были Шанхай, Пекин и Гуанчжоу, которые вошли в тройку лидеров, за ними следуют Шэньчжэнь, Чэнду, Ханчжоу, Циндао, Нанкин, Сиань, Сямынь и другие города. Существуют большие различия между провинциями по уровню развития въездного туризма. Среди 31 провинциального района Китая наибольшее количество прибывающих туристов (более 3 млн чел.) отмечается в Пекине, Ляонине, Шанхае, Цзянсу, Чжэцзяне, Шаньдуне и Гуандуне, которые находятся в экономически развитых провинциях и прибрежных районах восточной и южной частей страны. Популярность этих центров связана также с запуском в этих регионах новых маршрутов полетов, высокоскоростных железных дорог и более удобного общественного транспорта.

Среднее количество туристов, прибывающих в оставшиеся 24 провинции, меньше 1 млн чел., но посещаемость туристами этих провинций значительно выросла в последние годы (за 2000–2018 гг. – в 6–12 раз) [10].

При анализе возрастной структуры иностранных туристов в Китае отчетливо видно доминирование молодежи. Так, по итогам 2019 г., иностранные туристы в возрасте от 25 до 44 лет составляли 49,9 %, за ними следовали туристы в возрасте от 45 до 64 лет – 28,4 %, от 15 до 24 лет – 13,7 % от общего числа [11].

В последнее время был значительно упрощен въезд в страну. Введена 30-дневная безвизовая политика для въездного туризма на Хайнане. Пекин – Тяньцзинь – Хэбэй, дельта реки Янцзы, Гуандун и другие места ввели безвизовую политику на 144 ч для иностранцев. Ускорена работа службы пограничной инспекции «Интернет +». Более 1900 китайских и иностранных предприятий воспользовались онлайн-декларацией, что еще больше способствовало упрощению трансграничной торговли и оптимизации портовой бизнес-среды. В 2019 г. в 18 портах, в том числе в Пекине и Шанхае, создано 89 пограничных контрольно-пропускных каналов «Пояс и дорога», чтобы обеспечить быстрое таможенное прохождение для 300 тыс. пассажиров. Активно развивается RV-туризм и яхтенный туризм.

Туризм способствовал открытию китайской железной дороги Цинхай – Тибет, дал начало проекту строительства скоростных железных дорог большой протяженностью в целях развития внутреннего и международного туризма (30 тыс. км к 2030 г.), имеющих скорость свыше 300 км/ч. В страну или регион, где хорошо развита индустрия туризма, как правило, стекаются деловые и инвестиционные возможности.

В целом китайский рынок въездного туризма развивается стабильно, что показывает рейтинг международных туристических потоков в Китай в 2008–2018 гг. Доход от международного туризма в 2019 г. достиг 127,103 млрд долл., с ростом на 3,0 % по сравнению с 2018 г. (рис. 5).

В рейтинге поступлений от международного туризма за этот период Китай поднялся на три пункта, и его доля в мире продолжает расти. Это говорит о том, что туристический рынок Китая укрепляет свои позиции и становится более привлекательным для туристов всего мира.

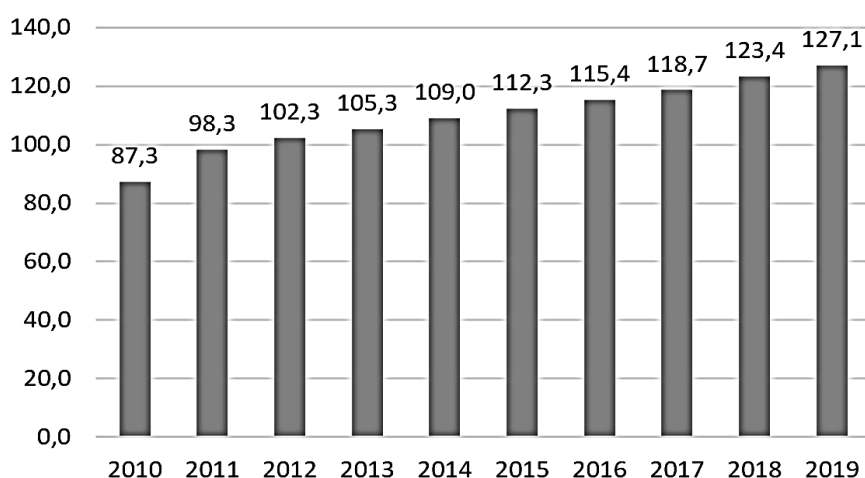


Рис. 5. Динамика дохода международного туризма КНР в 2009–2019 гг., млрд долл.
/ Fig. 5. Dynamics of international tourism income of the People's Republic of China in 2009–2019, billion dollars [11]

Заключение

Историческое прошлое Китая, великолепная культура, огромная территория, богатые туристические ресурсы и растущая международная популярность в последние годы привлекают всё больше иностранных туристов. Льготные условия бизнеса, большое количество дешевой рабочей силы вынуждают развитые страны выбирать для своих инвестиций Китай, поэтому все больше людей приезжают сюда для ведения бизнеса. Более 55 млн путешественников со всего мира посещают Китай ежегодно.

Лидерами стран – доноров въездных туристов являются Южная Корея, Япония, США и Россия. Европа, Америка, Австралия, Новая Зеландия и Океания также являются важными объектами туризма, причем в двустороннем порядке.

На рост доходов от иностранных туристов влияют такие факторы, как рост инвестиционных вложений, повышение роли Китая в мировой экономике, развитие делового туризма. Также большое влияние оказывают инфляция в странах, из которых прибывают туристы, рост числа самих туристов и разработка новых турпродуктов в Китае.

Поэтому насущной задачей является разработка новых предложений туристического продукта, туристических маршрутов, дальнейшее внедрение инновационных услуг и учёт конструктивных предложений и пожеланий иностранных туристов. В настоящее время индустрия туризма в Китае развивается стабильно. Рынок внутреннего туризма продолжает расти высокими темпами, рынок въездного туризма стабилизируется и набирает обороты.

Список источников

1. The Travel & Tourism Competitiveness Report 2019. The World Economic Forum. P. 65. URL: http://www3.weforum.org/docs/WEF_TTCR_2019.pdf (дата обращения: 18.07.2021).
2. Tourism Competitiveness Report 2009-2019. World Economic Forum. URL: http://www3.weforum.org/docs/WEF_TTCR_2019.pdf (дата обращения: 05.09.2021).
3. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. URL: <http://www.stats.gov.cn/tjsz/tjbk/> (дата обращения: 05.09.2021).
4. OECD. URL: <https://data.oecd.org/conversion/purchasing-power-parities-ppp.htm> (дата обращения: 10.07.2021).
5. Количество въезжающих туристов в Китай: цель въезда. URL: <https://www.ceicdata.com/zh-hans/china/visitor-arrival-by-visiting-purpose> (дата обращения: 10.07.2021).
6. *Ин Л.* Этапы развития туризма в Китае и его характеристики с позиции культурологии // Вестн. культуры и искусств. 2020. № 3 (63).
7. *Понкратова Л.А., Титова А.Д.* Развитие туризма в Китае и его межрегиональная дифференциация // Россия и Китай: история и перспективы сотрудничества : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Благовещенск: Благовещенский гос. пед. ун-т, 2018. С. 415–420.
8. *Ma Jia, Ivlieva O.V., Liu Chen, Tadjieva S.U.* Socio-economic state of chinese regions as a key factor of the dynamics of incoming international tourism (periods of formation and development of the tourism market in China) // Scientific Reports of Bukhara State University. 2021. № 5-6 (87/88). С. 182–195.
9. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. URL: <http://www.stats.gov.cn/tjsz/tjbk/> (дата обращения: 14.07.2021).
10. China's Ministry of Culture and Tourism. URL: <http://cn.chinaculture.org/> (дата обращения: 06.09.2021).
11. *Бай Сяюнь, Ли Яньпин.* Анализ развития въездного туризма Китая // Мировой рынок. 2017. № 8. С. 87–97.

References

1. *The Travel & Tourism Competitiveness Report 2019. The World Economic Forum.* P. 65. Available from: http://www3.weforum.org/docs/WEF_TTCR_2019.pdf [Accessed 18th July 2021].
2. *Tourism Competitiveness Report 2009-2019. World Economic Forum.* Available from: http://www3.weforum.org/docs/WEF_TTCR_2019.pdf [Accessed 5th September 2021].
3. *National Bureau of Statistics of the People's Republic of China.* Available from: <http://www.stats.gov.cn/tjsz/tjbk/> [Accessed 5th September 2021].
4. *OECD.* Available from: <https://data.oecd.org/conversion/purchasing-power-parities-ppp.htm> [Accessed 10th July 2021].

5. *Number of tourists entering China: Purpose of entry*. Available from: <https://www.ceicdata.com/zh-hans/china/visitor-arrival-by-visiting-purpose> [Accessed 10th July 2021]. (In Russ.).
6. Ying L. Stages of development of tourism in China and its characteristics from the position of cultural studies. *Vestn. kul'tury i iskusstv = Culture and Arts Herald*. 2020;(3). (In Russ.).
7. Ponkratova L.A., Titova A.D. Development of tourism in China and its inter-regional differentiation. *Russia and China: history and prospects of cooperation. Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Blagoveshchensk: Blagoveshchensk State Pedagogical University Press; 2018:415-420. (In Russ.).
8. Ma Jia, Ivlieva O.V., Liu Chen, Tadjieva S.U. Socio-economic state of Chinese regions as a key factor of the dynamics of incoming international tourism (periods of formation and development of the tourism market in China). *Scientific Reports of Bukhara State University*. 2021;(5-6):182-195.
9. *National Bureau of Statistics of the People's Republic of China*. Available from: <http://www.stats.gov.cn/tjzs/tjbk/> [Accessed 14th July 2021].
10. *China's Ministry of Culture and Tourism*. Available from: <http://cn.chinaculture.org/> [Accessed 6th September 2021].
11. Bai Xiaoyun, Li Yanping. Analysis of China's inbound tourism development. *Mirovoi rynok = World Market*. 2017;(8):87-97. (In Russ.).

Информация об авторах

О.В. Ивлиева – доктор географических наук, профессор, кафедра туризма, Высшая школа бизнеса.

Ма Цзэя – аспирант, кафедра туризма, Высшая школа бизнеса.

Лю Чэнь – аспирант, кафедра туризма, Высшая школа бизнеса.

Information about the authors

O.V. Ivlieva – Doctor of Science (Geography), Professor, Department of Tourism, Graduate School of Business.

Ma Jia – Postgraduate, Department of Tourism, Graduate School of Business.

Liu Chen – Postgraduate, Department of Tourism, Graduate School of Business.

*Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 04.04.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 16.05.2022.*

Научная статья

УДК 504.03

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-62-67

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ В МУНИЦИПАЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ

**Марина Васильевна Маканникова^{1✉}, Людмила Анатольевна Лапшакова²,
Наталья Викторовна Бельмач³**

^{1, 2, 3} Дальневосточный государственный аграрный университет, Благовещенск, Россия

¹markorschun@mail.ru✉

²lapshakova_lyadmila@mail.ru

³belmachnatalya@mail.ru

Аннотация. Раскрыты особенности и проблемы управления земельными ресурсами муниципального образования на современном этапе, представлены результаты исследований по изучению земельных ресурсов на примере Серышевского района Амурской области. Выявлено, что из общей площади земельного фонда 380 484 га земли сельскохозяйственного назначения занимают большую часть территории района – 295 648 га (77,7 %). Доказано, что определяющим видом экономической деятельности в Серышевском районе является сельское хозяйство. Выявлены основные проблемы, характерные для всех производственных организаций района: низкая конкурентоспособность продукции, высокая степень износа основных фондов, недостаточная загрузка производственных мощностей, медленный процесс реструктуризации. Разработаны мероприятия по перспективному развитию агропроизводственного комплекса района и охране земель сельскохозяйственного назначения; предложены направления по совершенствованию управления земельными ресурсами муниципального образования: усилия администрации района должны быть приоритетно направлены на стабилизацию производства, разрешение финансовых трудностей и разработку программ. Наиболее эффективными методами управления являются аренда муниципального имущества, в том числе земельных участков, а также работа по сбору налогов и арендной платы с должников.

Ключевые слова: муниципальные образования, земельные ресурсы, управление, сельское хозяйство, мероприятия, аренда, бюджет

Для цитирования: Маканникова М.В., Лапшакова Л.А., Бельмач Н.В. Совершенствование управления земельными ресурсами в муниципальном образовании // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 62–67.

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

Original article

IMPROVEMENT OF LAND MANAGEMENT IN THE MUNICIPALITY

Marina V. Makannikova^{1✉}, Lyudmila A. Lapshakova², Natalia V. Belmach³

^{1, 2, 3} Far Eastern State Agrarian University, Blagoveshchensk, Russia

¹markorschun@mail.ru✉

²lapshakova_lyadmila@mail.ru

³belmachnatalya@mail.ru

Abstract. The article reveals the features of land management of the municipality at the present stage, identifies problems in land management, presents the results of research on the study of land resources on the example of the Seryshevsky district of the Amur region and revealed that of the total land area of 380484 hectares, agricultural land occupies most of the territory of the district 295 648 hectares (77.7 %). It is proved that the defining type of

© Маканникова М.В., Лапшакова Л.А., Бельмач Н.В., 2022

economic activity in the Seryshevsky district is agriculture. The main problems characteristic of all industrial organizations of the district are identified: low competitiveness of products, high degree of depreciation of fixed assets, insufficient utilization of production capacities, slow restructuring process. Measures have been developed for the long-term development of the agricultural production complex of the district and the protection of agricultural land; directions for improving the management of municipal land resources are proposed: the efforts of the district administration should be prioritized to stabilize production, resolve financial difficulties and develop programs. The most effective management methods are the lease of municipal property, including land plots, as well as work on collecting taxes and rent from debtors.

Keywords: municipalities, land resources, management, agriculture, activities, rent, budget

For citation: Makannikova M.V., Lapshakova L.A., Belmach N.V. Improvement of Land Management in the Municipality. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):62-67. (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

Сегодня в области регулирования земельных отношений определяющую роль играют органы местного самоуправления, они имеют в своем распоряжении муниципальные земли, оформляют права собственности на земельные участки, осуществляют контроль, взимают плату за землю, утверждают регламент проведения работ в соответствии с планом землеустройства. С экономической точки зрения земля является материальной основой производственной деятельности и выступает объектом хозяйствования. Экологическая эффективность землеустройства влияет на окружающую среду через землеустроительные мероприятия (восстановление и консервирование земель, защита от эрозий, подтопления, иссушения). С территориальной точки зрения рациональное использование земель позволяет решить вопрос о четком закреплении границ землепользования. Главной проблемой управления земельными ресурсами является недостаточная изученность вопросов, касающихся регулирования земельных отношений, формирования рынка, а также отсутствие четких принципов управления земельными ресурсами [1–3].

Цель исследований – обоснование предложений, направленных на совершенствование эффективного управления земельными ресурсами как основы устойчивого развития муниципального образования (на примере Серышевского района Амурской области).

Объекты и методы исследования

Объект исследования – земельные ресурсы Серышевского района Амурской области. Общая площадь земельного фонда исследуемого района составляет 380 484 га. Земли сельскохозяйственного назначения занимают большую часть территории района – 295 648 га (77,7 %) – и используются для нужд сельского хозяйства (рис. 1) [4].

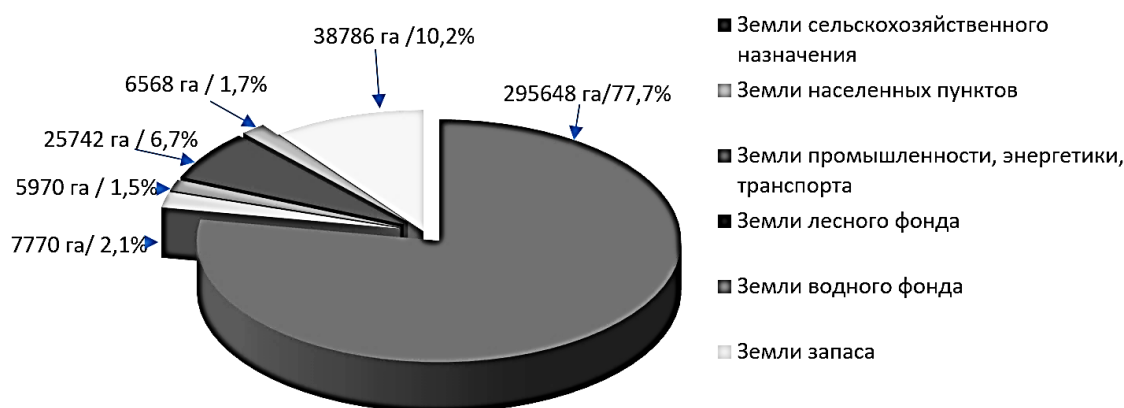


Рис. 1. Земельный фонд Серышевского района по категориям, 2020 г.
/ Fig. 1. Land fund of Seryshevsky district by category, 2020

В Серышевском районе основным видом угодий являются сельскохозяйственные – 241 453 га (64,1 %), в том числе пашни, общая площадь которых составляет 164 157 тыс. га (43,8 %), не-сельскохозяйственные угодья занимают 137 195 га (35,9 %).

Важным фактором персонификации пользования земельными ресурсами является процесс разграничения объектов земельной собственности на федеральные, региональные и муниципальные.

Изучив сведения, характеризующие распределение земельных ресурсов Серышевского района по формам собственности, можно отметить, что 270 208 га, или 70,5 % территории муниципального образования, находится в государственной или муниципальной собственности. В собственности граждан – 97 957 га (26,2 %), в собственности юридических лиц – 12 319 га (3,3 %). В то же время большая часть территории, принадлежащей физическим лицам, относится к землям сельскохозяйственного назначения – 95 118 га, а минимальная – 2839 га – к землям населенных пунктов (рис. 2).

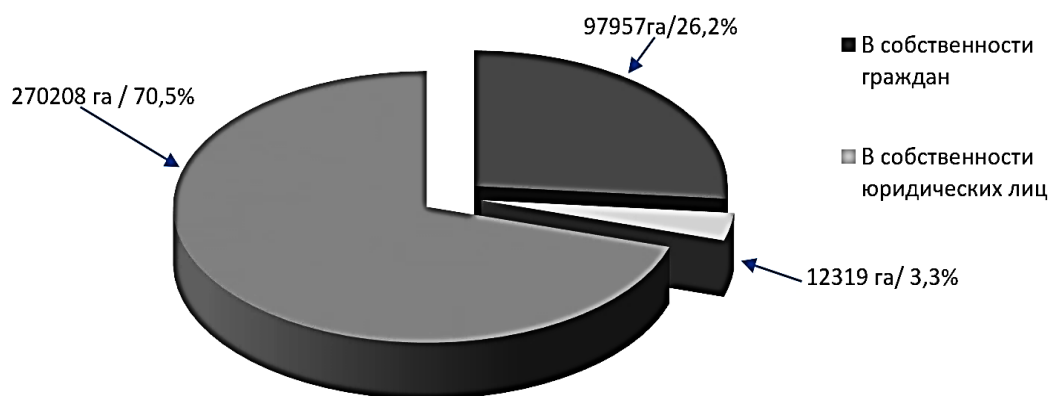


Рис. 2. Распределение земель Серышевского района по формам собственности, га
/ Fig. 2. Distribution of Seryshevsky district lands by ownership forms, ha

Всего в Серышевском районе предоставлено гражданам для производства сельскохозяйственной продукции 6 148 земельных участков общей площадью 22 817 га. При этом максимальное количество участков (4 189 ед.) площадью 2 670 га предоставлено под личное подсобное хозяйство. Самым привлекательным видом сельхозугодий для граждан является пашня, общая площадь которой составила 15 717 га. Общее количество земельных участков, предоставленных гражданам в муниципальном образовании Серышевский район, составляет 7 125 шт., площадь которых 80 235 га.

Климат на территории района континентальный с чертами муссонности. Почвы луговые, бурые лесные. Среднегодовая численность населения на 1 января 2022 г. составила 23 758 человек [5]. Район относится к числу малоурбанизированных. В Серышевский район входят 15 муниципальных образований, в том числе 1 городское поселение и 14 сельских.

На территории Серышевского района действуют 69 сельскохозяйственных товаропроизводителей. В 2020 г. сельхозтоваропроизводителями произведено валовой продукции на сумму 2038,94 млрд рублей. Урожайность зерновых культур в 2020 г. составила 17,5 ц/га, сои – 7,9 ц/га. Общая посевная площадь в хозяйствах в 2020 г. составила 105 023 га, что на 8,3 % ниже уровня 2019 г. Валовый надой молока сельхозтоваропроизводителями за 2020 г. по сравнению с 2019 г. увеличился на 32,0 % и составил 5 852 т. На территории района предусмотрены различные формы финансовой поддержки малого и среднего предпринимательства и инвестиционной деятельности.

В данном исследовании информационной базой послужили официальные статистические данные Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Амурской области, Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Амурской области, а также официальные данные, предоставленные администрацией Серышевского района и министерством сельского хозяйства Амурской области.

Обсуждение результатов

Основными проблемами, характерными для всех производственных организаций района, являются низкая конкурентоспособность продукции, высокая степень износа основных фондов, недостаточная загрузка производственных мощностей, медленный процесс реструктуризации [6].

Главная задача улучшения инвестиционной привлекательности муниципального образования Серышевского района – создание условий для формирования эффективной экономики, способной обеспечить последовательное повышение уровня и качества жизни населения на основе воспроизводства и модернизации промышленного и аграрного потенциалов, развития социальной сферы и инфраструктуры муниципального образования и его поселений. Основным видом деятельности в районе является сельское хозяйство, главная цель – удовлетворение потребностей населения в продуктах питания, а промышленности – в сырье. Для развития сельского хозяйства в Серышевском районе, согласно действующим государственным, областным формам поддержки, для ряда хозяйств были предложены следующие мероприятия: возмещение части затрат на приобретение элитных семян (реализация данного мероприятия предусмотрена в целях повышения урожайности, эффективности производства сельскохозяйственных культур, увеличения объема производства продукции растениеводства); оказание несвязанной поддержки сельскохозяйственным производителям в области растениеводства (реализация данного мероприятия направлена на увеличение уровня интенсивности использования посевных площадей путем внесения удобрений); возмещение части затрат, связанных с приобретением сельскохозяйственной техники и оборудования; поддержка племенного животноводства; возмещение части затрат на строительство и реконструкцию объектов производственной инфраструктуры в животноводстве.

Экономическая эффективность предложенных мероприятий будет отражаться на увеличении доходов бюджета Серышевского района.

В результате анализа данных Росреестра выявлено, что наиболее опасными негативными процессами на территории исследуемого района являются переувлажнение, заболачивание, подтопление, нарушение земель [7]. Негативным процессам подвержены 40 185 га площади обследуемой территории, исключение составили земли сельскохозяйственного назначения и земельные участки, предоставленные для ведения садоводства, огородничества и дачного строительства. Наибольшая площадь, которая подвержена переувлажнению, – 22 286 га. Для осушения этой территории в качестве основного метода используется перехват склонового поверхностного стока на границе объекта, а в качестве дополнительного – уменьшение притока поверхностных вод со стороны. Также нами предложены агротехнические и противоэрозионные мероприятия [8].

Рациональное использование этих земель возможно только после проведения коренной мелиорации, заключающейся в их осушении путем устройства систематической сети открытых каналов, регулирования стока р. Зея, фрезерования поверхности почвы, срезки кочек и кустарников, внесения извести, удобрений, подсева трав.

В числе основных задач муниципальной власти – управление земельными ресурсами и земельными отношениями. Проводимые на сегодняшний день земельные преобразования нуждаются в совершенствовании системы управления ресурсами муниципальных земель, обеспечении эффективного финансового и кадрового менеджмента, качественной оценки земель и т.д. [9].

Важным критерием экономической эффективности управления земельными ресурсами является значительное увеличение доходной части бюджета [10]. Осуществить это возможно за счет операций, связанных с хозяйственным оборотом земельных участков и иных объектов недвижимости, контроля за субъектами и объектами земельных отношений при рациональной экономии бюджетных средств, направляемых на осуществление функций управления земельными ресурсами.

В 2021 г. количество земельных участков, предоставленных в аренду, по сравнению с 2019 г. увеличилось на 95 (в 1,2 раза), но при этом площадь земель уменьшилась на 1798,8 га (0,98 %). Начисленная арендная плата уменьшилась на 11 569,88 р. (0,78 %) (таблица). Поступления в бюджет от земельного налога уменьшились на 19 090,67 тыс. р., с арендной платы – на 10 394,17 тыс. р. Увеличение сумм собранного земельного налога у физических лиц на 923,34 тыс. р., связанное с оформлением ряда земельных участков в собственность, не смогло компенсировать снижение доходов бюджета. Снижение поступлений в бюджет от юридических

лиц обусловлено тем, что с 01.01.2019 налоговая база определяется по кадастровой стоимости земельного участка, а не по количеству гектаров. Причиной этого также может служить перевод земель юридических лиц в земли, которые облагаются по меньшей ставке (0,3 % – с земель сельскохозяйственного назначения и земель жилищного фонда; 1,5 % – с остальных земель).

**Состояние доходной базы местного бюджета муниципального образования Серышевский район
за 2019–2021 гг. / The state of the revenue base of the local budget of the municipality
of Seryshevsky district for 2019-2021**

Показатель	2019	2020	2021	Отклонение	
				Абсолютное (2021–2019 гг.)	Относительное, %
Количество земельных участков, предоставленных в аренду	446	538	541	95	1,2 раза
Площадь земель, предоставленных в аренду, га	136 496,2	139 473,9	134 697,4	–1798,8	0,98
Начисленная арендная плата, тыс. р.	54 722,18	55 718,08	43 152,3	–11 569,88	0,78
Земельный налог всего, тыс. р.	39 987,40	15 075,54	20 896,73	–19 090,67	52,2
в том числе:					
Юридические лица	36 645,13	1 081,32	16 631,12	–20 014,01	45,3
Физические лица	3342,27	4994,22	4265,61	923,34	127,6
Арендная плата (поступления), тыс. р.	52 225,78	53 651,08	41 831,61	–10 394,17	80

Выводы

Определяющим видом экономической деятельности в Серышевском районе является сельское хозяйство. Усилия администрации района должны быть приоритетно направлены на стабилизацию производства, помощь в производстве и реализации сельскохозяйственной продукции, разрешение финансовых трудностей и разработку программ.

В целях увеличения доходной части бюджета следует усилить контроль за своевременностью и полнотой внесения арендной платы за землю. Кроме этого, необходимо постоянно вести претензионно-исковую работу с задолжниками по арендной плате, которая является одним из главных экономико-правовых механизмов управления земельными ресурсами, способом эффективного обеспечения полноты и сроков поступления земельных платежей, контроля за выполнением договорных обязательств.

Список источников

1. Волков С.Н., Комов Н.В., Хлыстун В.Н. Как достичь эффективного управления земельными ресурсами в России? // Междунар. сельскохозяйств. журн. 2015. № 5. С. 3–7.
2. Ткачева О.А., Чернова А.И. Управление земельными ресурсами: инвентаризационный аспект // Экономика и экология территориальных образований. 2020. Т. 4, № 4. С. 26–32.
3. Мельникова А.Е. Формирование функциональной модели управления земельными ресурсами в муниципальном образовании // Вестн. современных исследований. 2018. № 6 (26). С. 263–265.
4. Годовой статистический отчет о наличии земель и распределении их по формам собственности, категориям, угодьям и пользователям по состоянию на 1 января 2021 г. в Амурской области (Серышевский район). Благовещенск: Управление Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Амурской области, 2020. 197 с.
5. Амурский статистический ежегодник-2021: стат. сб. Благовещенск: Амурстат, 2021. 405 с.
6. Маканникова М.В. Совершенствование управления земельными ресурсами (на примере Архаринского района Амурской области) // Региональные геосистемы. 2020. № 3 (44). С. 295–306.

7. Аналитическая записка о состоянии и использовании земель на территории Серышевского муниципального района Амурской области. URL: <https://rosreestr.gov.ru/about/struct/territorialnye-organy/upravlenie-rosreestra-po-amurskoj-oblasti/> (дата обращения: 20.01.2022).

8. Makannikova M.V., Belmach N.V., Lapshakova L.A. Land conservation as an integral part of the land use planning process // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 547.

9. Kim V.A., Zolotukhina T.O., Stekolnikova G.A. К вопросу о совершенствовании системы управления земельными ресурсами Селемджинского района Амурской области // Актуальные проблемы землеустройства, кадастра и природообустройства : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж : Воронеж. гос. аграр. ун-т, 2019. С. 154–158.

10. Бельмач Н.В., Кузьмич Н.П. Организационно-методологические аспекты государственной кадастровой оценки земель промышленности и иного назначения // РИСК: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2021. № 2. С. 101–103.

References

1. Volkov S.N., Komov N.V., Khlystun V.N. How to achieve effective land management in Russia? *Mezhdunar. sel'skokhoz. zhurn. = International Agricultural Journal*. 2015;(5):3-7. (In Russ.).

2. Tkacheva O.A., Chernova A.I. Land management: inventory aspect. *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy = Economy and Ecology of Territorial Formations*. 2020;4(4):26-32. (In Russ.).

3. Melnikova A.E. Formation of a functional model of land management in a municipal formation. *Vestn. sovremennykh issledovaniy = Bulletin of Modern Research*. 2018;(6):263-265. (In Russ.).

4. *Annual statistical report on the availability of land and their distribution by ownership forms, categories, lands and users as of January 1, 2021 in the Amur region (Seryshevsky district)*. Blagoveshchensk: Department of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography in the Amur Region Press; 2020. 197 p. (In Russ.).

5. *Amur Statistical Yearbook 2021: statistical collection*. Blagoveshchensk: Amurstat Press; 2021. 405 p. (In Russ.).

6. Makannikova M.V. Improvement of land resources management (on the example of the Arkharinsky district of the Amur region). *Regional'nye geosistemy = Regional Geosystems*. 2020;(3):295-306. (In Russ.).

7. *Analytical note on the state and use of land in the territory of the Seryshevsky municipal district of the Amur region*. Available from: <https://rosreestr.gov.ru/about/struct/territorialnye-organy/upravlenie-rosreestra-po-amurskoj-oblasti/> [Accessed 20th January 2022]. (In Russ.).

8. Makannikova M.V., Belmach N.V., Lapshakova L.A. Land conservation as an integral part of the land use planning process. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020;547.

9. Kim V.A., Zolotukhina T.O., Stekolnikova G.A. On the issue of improving the land management system of the Selyemdzhinsky district of the Amur Region. *Actual problems of land management, cadastre and environmental management. Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2019:154-158. (In Russ.).

10. Belmach N.V., Kuzmich N.P. Organizational and methodological aspects of the state cadastral assessment of industrial and other purpose lands. *RISK: resursy, informatsiya, snabzhenie, konkurentsya = RISK: Resources, Information, Supply, Competition*. 2021;(2):101-103. (In Russ.).

Информация об авторах

М.В. Маканникова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующая кафедрой геодезии и землеустройства.

Л.А. Лапшакова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра геодезии и землеустройства.

Н.В. Бельмач – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра геодезии и землеустройства.

Information about the authors

M.V. Makannikova – Candidate of Science (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Geodesy and Land Management.

L.A. Lapshakova – Candidate of Science (Agriculture), Associate Professor, Department of Geodesy and Land Management.

N.V. Belmach – Candidate of Science (Agriculture), Associate Professor, Department of Geodesy and Land Management.

Статья поступила в редакцию 26.02.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 26.02.2022; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 16.05.2022.

Научная статья
УДК 631.417.2:631.445.4(571.150)
doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-68-73

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЧВЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА В ЧЕРНОЗЁМАХ ВЫЩЕЛОЧЕННЫХ УМЕРЕННО ЗАСУШЛИВОЙ И КОЛОЧНОЙ СТЕПИ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Геннадий Геннадьевич Морковкин¹, Алёна Сергеевна Стребкова²,
Нина Борисовна Максимова³, Светлана Сергеевна Слажнева⁴✉

¹Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

^{2, 3, 4}Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

¹ggmork@mail.ru

²alena040994@mail.ru

³ninmaxim@mail.ru

⁴swetik315@mail.ru✉

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния различных способов использования почвы на содержание гумуса в чернозёме выщелоченном в условиях умеренно засушливой и колючной степи Алтайского края. Отбор почвенных образцов проводили на базе опытных полей в учхозе «Пригородное» и ФГУП «Комсомольский» Павловского района. Рассмотрены следующие варианты использования почв: традиционная технология, минимальная технология, многолетняя залежь (18 лет), целина (естественный сенокос). Содержание гумуса определяли по методу И.В. Тюрина, повторность трехкратная. Показано, что применение технологий сберегающего земледелия способствует увеличению аккумуляции почвенного углерода и, как следствие, гумусированности почвы. Установлено, что при использовании традиционной технологии возделывания почв содержание гумуса в почве ниже на фоне многолетней залежи и целины (естественный сенокос). В опыте при использовании традиционной технологии выявлено минимальное значение содержания гумуса в подпахотном горизонте. При применении минимальной технологии содержание гумуса в почве преобладает в 1,5 раза по сравнению с традиционной. Адаптация ресурсосберегающих технологий к условиям умеренно засушливой и колючной степи Алтайского края позволит снизить интенсивность механического воздействия на почвы, улучшить экологическое состояние агроландшафтов и оптимизировать системы земледелия.

Ключевые слова: почва, плодородие, дыхание почвы, традиционная технология, минимальная технология, залежь, почвенная эмиссия CO₂

Для цитирования: Морковкин Г.Г., Стребкова А.С., Максимова Н.Б., Слажнева С.С. Влияние способов использования почвы на изменение содержания гумуса в чернозёмах выщелоченных умеренно засушливой и колючной степи Алтайского края // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 68–73.

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

Original article

THE INFLUENCE OF SOIL USE METHODS ON THE CHANGES IN THE HUMUS CONTENT IN LEACHED CHERNOZEMS OF THE MODERATELY ARID AND FOREST-OUTLIER STEPPE OF THE ALTAI TERRITORY

Gennady G. Morkovkin¹, Alyona S. Strebkova², Nina B. Maximova³, Svetlana S. Slazhneva⁴

¹State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

^{2, 3, 4}Altai State University, Barnaul, Russia

¹ggmork@mail.ru

²alena040994@mail.ru

³ninmaxim@mail.ru

⁴swetik315@mail.ru✉

Abstract. The results of a study of the influence of various soil use methods on the humus content in leached chernozem under the conditions of the moderately arid and forest-outlier steppe of the Altai Territory are presented in this article. Soil sampling was carried out on the basis of experimental fields in the Educational farm "Prigorodnoe" and the FSUE "Komsomolsky", Pavlovsky District. The following variants of soil use as traditional technology, minimum technology, perennial fallow land (18 years), virgin land (natural haymaking) are considered. We determined the humus content using I.V. Tyurin's method, repeated three times. The article shows that the use of conservation agriculture technologies contributes to an increase in the accumulation of soil carbon, and as a result, an increase in soil humus content. It has been established that when using traditional soil cultivation technology, the humus content in the soil is lower against the background of perennial fallow land (18 years), virgin land (natural haymaking). During the experiment with traditional technology, we revealed the minimum value of the humus content in the subsurface horizon. When using the minimum technology, the humus content in the soil prevails 1.5 times compared to the traditional one. Adaptation of resource-saving technologies to the conditions of the moderately arid and forest-outlier steppe of the Altai Territory will reduce the intensity of mechanical impact on soils, improve the ecological state of agricultural landscapes and optimize farming systems.

Keywords: soil, fertility, soil respiration, traditional technology, minimal technology, fallow land, soil CO₂ emission

For citation: Morkovkin G.G., Strebkova A.S., Maximova N.B., Slazhneva S.S. The Influence of Soil Use Methods on the Changes in the Humus Content in Leached Chernozems of the Moderately Arid and Forest-Outlier Steppe of the Altai Territory. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):68-73. (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 условиях глобального изменения климата, постоянного увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере актуальными становятся исследования, направленные на изучение принципов сокращения потерь парниковых газов за счет снижения антропогенных выбросов и интенсификации поглощения углерода из атмосферы. В 2015 г. на 21-й конференции сторон Рамочной конвенции ООН по вопросам изменения климата в Париже была предложена инициатива «4 промилле», которая фокусируется на представлении о том, что увеличение запасов углерода в верхнем слое почв на 0,4 % в год в большей степени компенсирует антропогенную эмиссию CO₂ в атмосферу. С развитием данной идеи в 2019 г. во Франции состоялась Международная конференция «Продовольственная безопасность и изменение климата: инициатива "4 на 1000" – новые ощутимые глобальные вызовы для почвы» [1]. Рассмотренная инициатива обеспечивает не только секвестрирование атмосферного углерода, но и повышение плодородия почв за счет возрастания объемов почвенного углерода.

Мировое сообщество активно разрабатывает принципы низкоуглеродной зелёной экономики, которые заключаются в том, чтобы поглотить из атмосферы некоторое количество парниковых газов и зафиксировать их в биомассе, в органическом веществе почвы. В Российской Федерации при рассмотрении перспектив низкоуглеродного природопользования был составлен план Правительства РФ по адаптации к изменениям климата, а также в разработке находятся «Стратегия низкоуглеродного развития России», «Закон об углеродном регулировании». Согласно [2], запас

почвенного органического углерода составляет 1500 Гт, при этом в почвенном покрове России сосредоточено 296 Гт почвенного органического углерода. Это говорит о том, что при рациональном возделывании сельскохозяйственные земли могут служить крупнейшим резервуаром для углерода в биосфере. Анализ научных данных показывает, что нерациональное использование сельскохозяйственных угодий и пашни может увеличивать выбросы почвенного углерода в атмосферу в виде диоксида углерода (CO₂), что приведёт к увеличению концентрации парниковых газов и ускорению изменения климата [3]. В связи с этим для защиты почв сельскохозяйственных угодий от снижения содержания органического углерода необходимо применять технологии сберегающего земледелия, которые позволят не только сохранить, но и увеличить аккумуляцию углерода. В свою очередь, органический углерод в почве является ценным ресурсом, способствующим увеличению гумусированности почвы.

Интенсивное сельскохозяйственное использование почв привело к значительному снижению содержания гумуса в чернозёмах Алтайского края. Так, со времени первого тура почвенных обследований территории Алтайского края (1960-е гг.) его содержание сократилось на 26 %, что явилось следствием активного вовлечения в пахотный оборот целинных и залежных земель и смены естественной растительности сельскохозяйственными культурами с уменьшением поступления органического вещества в почву, возрастания процессов минерализации органического вещества, уплотнения пахотного слоя, снижения влагоемкости, водопроницаемости почв, усиления процессов эрозии почв [4]. По данным Г.Г. Морковкина [5], при использовании пашни в её составе наибольшее уменьшение содержания гумуса наблюдается в обыкновенных чернозёмах. За 100 лет их сельскохозяйственного использования потеряно половина процентного содержания гумуса в верхнем горизонте.

Поэтому важным направлением совершенствования технологий возделывания сельскохозяйственных культур в Алтайском крае должна стать разработка эффективных технологий сберегающего земледелия, применение которых способствует увеличению содержания гумуса, сбережению или увеличению запасов углерода в почве и обеспечивает экономию материально-технических затрат.

Исследованиями установлено, что по сравнению с традиционной обработкой длительное применение минимальной обработки увеличивает содержание гумуса в пахотном слое [6], сокращение глубины и частоты механической обработки почвы приводит к сокращению потерь гумуса за счет снижения интенсивности процессов минерализации органического вещества. Так, при использовании минимальной обработки почвы темпы сокращения запасов гумуса в пахотном слое были в 1,5–2,0 раза слабее по сравнению с традиционной обработкой [7]. При использовании залежи как инструмента ресурсосберегающего земледелия восстановление содержания гумуса в пахотном слое чернозёма выщелоченного, находившегося 25 лет под традиционной обработкой, наблюдается после 15 лет произрастания многолетней травянистой растительности. Увеличение накопления гумуса в пахотном слое чернозёма выщелоченного, находящегося в залежном состоянии в течение 15 лет, составляет 1,7–1,9 т/га в год [8]. Таким образом, необходима детальная информация о влиянии способов использования почвы в конкретных почвенно-климатических условиях на содержание гумуса как одного из основных показателей почвенного плодородия, что в условиях умеренно засушливой и колючей степи Алтайского края изучено недостаточно.

Цель наших исследований заключается в изучении влияния различных способов использования почвы на содержание гумуса в чернозёме выщелоченном в условиях умеренно засушливой и колючей степи Алтайского края.

Материалы и методы исследования

Исследования, связанные с определением содержания гумуса в чернозёме выщелоченном, проводили в условиях умеренно засушливой и колючей степи Алтайского края на базе опытных полей в учхозе «Пригородное» и ФГУП «Комсомольский» Павловского района. По агроклиматическому районированию подзона умеренно засушливой и колючей степи Алтайского края относится к тёплому недостаточно увлажненному району, для которого характерен период с устойчивым снежным покровом – 155–170 дней, высота снежного покрова в среднем не превышает 25–30 см, наибольшая глубина промерзания почвы – 200–250 см. Средняя температура июля составляет 18–19 °С, годовое количество осадков не превышает 150–200 мм, влагообеспеченность пахотных почв весной зависит от осенне-зимних запасов влаги, ГТК 1,0–0,8 [9].

Схема опыта предусматривала изучение следующих вариантов: традиционная технология, минимальная технология, многолетняя залежь (18 лет), целина (естественный сенокос). Для анализа были отобраны образцы почв послойно 0–20 и 20–40 см в трехкратной повторности по каждому варианту способов использования почвы, каждая из которых формировалась путем смешанного образца из восьми точек отбора методом конверта. Содержание гумуса определяли по методу И.В. Тюрина, повторность трехкратная. Статистическая обработка результатов исследования осуществлялась по Б.А. Доспехову [10, 11]. При обобщении результатов исследований использовали методологию сравнительного и системного анализа.

Результаты и обсуждение

Почвы Алтайского края испытывают колоссальную антропогенную нагрузку, связанную со значительной распаханностью территории и длительным использованием почв в составе пахотных угодий по традиционным технологиям земледелия. Так, в составе сельскохозяйственных угодий Алтайского края пахотные земли составляют в среднем 64 %, причем в степных районах доля пашни достигает 70–80 % и более [12].

В пахотных почвах по природно-почвенным зонам Алтайского края наблюдается сокращение доли площадей видов почв с относительно высоким содержанием гумуса и, соответственно, увеличение площадей видов почв с более низким его содержанием [12]. Наиболее ярко эти процессы проявляются в условиях засушливой и умеренно засушливой степи. В наблюдаемых пахотных почвах активизируются процессы минерализации органического вещества за счет высокой аэрации пахотного слоя с последующей дегумификацией.

Известно, что традиционная технология возделывания сельскохозяйственных культур, включающая использование вспашки с оборотом пласта почвы, приводит к активизации вышеуказанных процессов, в свою очередь, использование технологий с минимальной обработкой способствует снижению негативного воздействия на агроландшафты, экономии ресурсов и снижению выбросов парниковых газов, депонированию в почве органического углерода [13]. Адаптация ресурсосберегающих технологий к условиям умеренно засушливой и колочной степи Алтайского края позволит оптимизировать энергозатраты на производство сельскохозяйственной продукции и в целом улучшить экологическое состояние агроландшафтов.

Исследования показали, что в опыте на территории учхоза «Пригородное» (табл. 1) при использовании традиционной технологии содержание гумуса в почве ниже, чем на фоне многолетней залежи и целины, на глубине 0–20 см в среднем на 23,7 %, 20–40 см – на 32,8 %, что говорит об усилении процессов минерализации органического вещества при интенсивном механическом воздействии.

В почве под многолетней залежью происходит увеличение содержания гумуса за счет большего поступления растительных остатков в виде обильной корневой биомассы. Значительное накопление гумуса под залежью по сравнению с традиционной технологией использования почвы наблюдается и в нижележащих горизонтах (20–40 см), что также связано с большей биомассой корневого опада в залежных условиях.

При изучении залежи как средства восстановления содержания гумуса было установлено, что многолетняя залежь способствует его образованию и улучшению физических, химических и биологических свойств почвы. Однако залежные почвы по содержанию гумуса не достигли показателей целины (естественного сенокоса) даже за счет значительного накопления гумуса, так как условия, складывающиеся в целинных почвах, способствуют прочной фиксации гумусовых соединений. Таким образом, для данного варианта опыта под целиной отмечено максимальное значение содержания гумуса.

Таблица 1 / Table 1

Содержание гумуса в чернозёме выщелоченном умеренно засушливой и колочной степи Алтайского края (учхоз «Пригородное»), % / The humus content in leached chernozem of a moderately arid and forest-outlier steppe of the Altai Territory (Educational farm “Prigorodnoye”), %

Глубина отбора образца, см	Способ использования почв			НСР ₀₅
	Традиционная технология	Многолетняя залежь (18 лет)	Целина (естественный сенокос)	
0–20	4,26	5,04	6,14	0,08
20–40	2,95	3,67	5,12	0,1

Результаты определения содержания гумуса в зависимости от способа использования почв на территории ФГУП «Комсомольский» (табл. 2) показали тенденции положительного действия использования минимальной технологии возделывания сельскохозяйственных культур.

При применении минимальной технологии содержание гумуса в почве возрастает в слое 0–20 см на 0,29 % и в слое 20–40 на 0,55 % по сравнению с традиционной технологией. Таким образом, минимизация обработки позволяет сохранить органическое вещество почвы, проведение обработок без интенсивного механического воздействия сдерживает процесс минерализации органического вещества.

Таблица 2 / Table 2

Содержание гумуса в чернозёме выщелоченном умеренно засушливой и колочной степи Алтайского края (ФГУП «Комсомольский»), % / The humus content in leached chernozem of a moderately arid and forest-outlier steppe of the Altai Territory (FSUE “Komsomolsky”), %

Глубина отбора образца, см	Способ использования почв		НСП ₀₅
	Традиционная технология	Минимальная технология	
0–20	4,35	4,64	0,15
20–40	2,91	3,46	0,1

Выводы

В результате исследований показано, что традиционная технология использования почв, включающая отвальную вспашку, способствует активной минерализации органического вещества и снижению содержания гумуса в почве. Так, по сравнению с целинной почвой это снижение составило по слоям почвы: в слое 0–20 см – на 1,88 %, в слое 20–40 см – на 2,17 %.

При сравнительных исследованиях различных способов использования почв на чернозёмах выщелоченных умеренно засушливой и колочной степи Алтайского края установлена ресурсосберегающая роль минимальной технологии возделывания сельскохозяйственных культур, обеспечивающая сохранение органического вещества почв. В варианте опыта на территории учхоза «Пригородное» введение многолетней залежи обеспечивает не только сохранение, но и повышение содержания гумуса на 0,78 % в слое 0–20 см, на 0,72 % – в слое 20–40 см. Таким образом, применение минимальной обработки почвы и выведение почвы в залежное состояние способствуют депонированию углерода почвой.

Список источников

1. Контбойцева А.А., Красильников П.В., Романенков В.А., Сорокин А.С. Управление углеродом // Агробизнес. 2020. № 4. С. 58–63.
2. Field C.B., Raupach M.R. The global carbon cycle: integrating humans, climate and the natural world. Scope 62. Washington, USA: Island Press, 2004. 38 p.
3. Петросян Р.Д., Окорков В.В. Роль почв в смягчении климатических изменений // Изв. ОГАУ. 2019. № 2 (76). С. 8–11.
4. Морковкин Г.Г., Овцинов В.И., Максимова Н.Б., Байкалова Т.В., Литвиненко Е.А. Анализ состояния и динамики свойств пахотных почв степной зоны Алтайского края // Вестн. АГАУ. 2016. № 10 (144). С. 30–36.
5. Морковкин Г.Г. Антропогенная трансформация почвообразования и плодородия чернозёмов в системе агроценозов (на примере степной зоны Алтайского края). Барнаул: РИО АГАУ, 2012. 271 с.
6. Шарков И.Н. Минимизация обработки и ее влияние на плодородие почвы // Земледелие. 2009. № 3. С. 24–27.
7. Власенко А.Н., Кудашкин П.И., Власенко Н.Г. Влияние ресурсосберегающих технологий на содержание гумуса в чернозёме выщелоченном северной лесостепи Западной Сибири // Земледелие. 2020. № 5. С. 3–5.
8. Ерёмин Д.И. Залесь как средство восстановления содержания и запасов гумуса старопашотных чернозёмов лесостепной зоны Зауралья // Плодородие. 2014. № 1 (76). С. 24–26.
9. Агроклиматические ресурсы Алтайского края. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 155 с.
10. Кауричев И.С. Практикум по почвоведению. М.: Колос, 1980. 272 с.
11. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
12. Морковкин Г.Г., Байкалова Т.В., Максимова Н.Б., Овцинов В.И., Литвиненко Е.А., Дёмина И.В., Дёмин В.А. Оценка временной динамики структуры агроландшафтов и показателей плодородия почв степной зоны Алтайского края // Вестн. АГАУ. 2013. № 9 (107). С. 33–42.

13. Казеев К.Ш., Мокриков Г.В., Акименко Ю.В., Мясникова М.А., Колесников С.И. Влияние технологии No-till на экологическое состояние чернозёмов южных Ростовской области // Достижения науки и техники АПК. 2020. № 1. С. 7–11.

References

1. Kontoboytseva A.A., Krasilnikov P.V., Romanenkov V.A., Sorokin A.S. Carbon management. *Agrobiznes = Agrobusiness*. 2020;(4):58-63 (In Russ.).
2. Field C.B., Raupach M.R. SCOPE 62. *The global carbon cycle: integrating humans, climate and the natural world*. Washington, USA: Island Press; 2004. 38 p.
3. Petrosyan R.D., Okorkov V.V. The role of soils in the easing of climatic changes. *Izv. OGAU = Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2019;(2):8-11. (In Russ.).
4. Morkovkin G.G., Ovtsinov V.I., Maksimova N.B., Baykalova T.V., Litvinenko E.A. Analysis of the state and dynamics of some properties of arabal soils in the steppe zone of the Altai territory. *Vestn. AGAU = Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2016;(10):30-36. (In Russ.).
5. Morkovkin G.G. *Anthropogenic transformation of soil formation and fertility of chernozems in the system of agrocenoses (on the example of the steppe zone of the Altai Territory)*. Barnaul: Altai State Agricultural University Press; 2012. 271 p. (In Russ.).
6. Sharkov I.N. Minimization of cultivation and its impact on soil fertility. *Zemledelie = Agriculture*. 2009;(3):24-27. (In Russ.).
7. Vlasenko A.N., Kudashkin P.I., Vlasenko N.G. The influence of resource-saving technologies on the content of humus in the leached chernozem soils of the northern forest-steppe of Western Siberia. *Zemledelie = Agriculture*. 2020;(5):3-5. (In Russ.).
8. Eremin D.I. Fallowing as a means for restoring the content and reserves of humus in old arable chernozems of the transural forest-steppe zone. *Plodorodie = Fertility*. 2014;(1):24-26. (In Russ.).
9. *Agro-climatic resources of the Altai territory*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1971. 155 p. (In Russ.).
10. Kaurichev I.S. *Soil sciences workshop*. Moscow: Kolos Publ.; 1980. 272 p. (In Russ.).
11. Dospikhov B.A. *Field experience methodology*. Moscow: Agropromizdat Publ.; 1985. 351 p. (In Russ.).
12. Morkovkin G.G., Baykalova T.V., Maksimova N.B., Ovtsinov V.I., Litvinenko E.A., Demina I.V., Demin V.A. Estimation of the temporal dynamics of the structure of agricultural landscapes and indicators of soil fertility in the steppe zone of the Altai Territory. *Vestn. AGAU = Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2013;(9):33-42. (In Russ.).
13. Kazeev K.Sh., Mokrikov G.V., Akimenko Yu.V., Myasnikova M.A., Kolesnikov S.I. The influence of no-till technology on the ecological state of the southern chernozems in the Rostov region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AIC*. 2020;(1):7-11. (In Russ.).

Информация об авторах

Г.Г. Морковкин – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры почвоведения, экологии и природопользования.

А.С. Стребкова – преподаватель, кафедра природопользования и геоэкологии.

Н.Б. Максимова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры природопользования и геоэкологии.

С.С. Слажнева – кандидат географических наук, доцент кафедры природопользования и геоэкологии.

Information about the authors

G.G. Morkovkin – Doctor of Science (Agriculture), Professor, Professor of Department of Soil Science, Ecology and Nature Management.

A.S. Strebkova – Lecturer, Department of Nature Management and Geoecology.

N.B. Maksimova – Candidate of Science (Agriculture), Associate Professor, Associate Professor of Department of Nature Management and Geoecology.

S.S. Slazhneva – Candidate of Science (Geography), Associate Professor of Department of Nature Management and Geoecology.

Статья поступила в редакцию 14.02.2022; одобрена после рецензирования 22.02.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 14.02.2022; approved after reviewing 22.02.2022; accepted for publication 16.05.2022.

Научная статья
УДК 502.3.:630(470.6)
doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-74-84

КЛИМАТОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ГОРНО-ЛЕСНЫХ АССОЦИАЦИЙ И ВЕКТОР УСТОЙЧИВЫХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СУКЦЕССИЙ

**Вячеслав Валентинович Онищенко^{1✉}, Наталья Сергеевна Дега²,
Аубекир Умарович Эдиев³, Дмитрий Александрович Липилин⁴**

^{1,2,3}Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева, Карачаевск,
Карачаево-Черкесская Республика, Россия

⁴Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

⁴Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

¹ovv333@mail.ru ✉

²dega999@mail.ru

³aubekir09@yandex.ru

⁴lipilin_dmitrii@mail.ru

Аннотация. В границах Тебердинского государственного природного биосферного заповедника расположены популярные туристско-экскурсионные и горнолыжные центры Теберда и Домбай. Следствием рекреационного освоения района стало усыхание основного яруса эндемичного темнохвойного лесного массива, расположенного в зоне локальных природно-климатических процессов, трансформирующихся под влиянием антропогенной деятельности. Происходит дальнейшая деградация уникального горно-лесного ландшафта. Комплексные геоэкологические исследования, с применением геохимических, лесоводственно-таксационных, физико-географических методов и средств дистанционного зондирования (снимки с космического аппарата Landsat 8), при сопоставлении модели полей температуры воздуха с планом лесонасаждений и фитоценотической картой позволили определить экологические ниши для доминантов в модельном темнохвойном массиве. Определены относительные градиенты теплового поля различных ассоциаций. Установлены площади лесных участков, различные по потокам скрытого тепла, в зависимости от степени деградации основного яруса и характера процесса сукцессии. Определены оптимальные экологические условия вектора естественного лесовосстановления.

Ключевые слова: рекреация, усыхание древостоя, космоснимки, тепловые поля, сукцессии, лесовосстановление

Для цитирования: Онищенко В.В., Дега Н.С., Эдиев А.У., Липилин Д.А. Климатогенная трансформация горно-лесных ассоциаций и вектор устойчивых восстановительных сукцессий // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 74–84.

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

Original article

CLIMATOGENIC TRANSFORMATION OF MOUNTAIN FOREST ASSOCIATIONS AND THE VECTOR OF STABLE RESTORATIVE SUCCESIONS

Vyacheslav V. Onischenko^{1✉}, Natalya S. Dega², Aubekir U. Ediev³, Dmitriy A. Lipilin⁴

^{1,2,3}Karachay-Cherkess State University named after U.D. Aliev, Karachaevsk, Karachay-Cherkess Republic, Russia

⁴Kuban State University, Krasnodar, Russia

⁴Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

¹ovv333@mail.ru ✉

²dega999@mail.ru

³aubekir09@yandex.ru

⁴lipilin_dmitrii@mail.ru

© Онищенко В.В., Дега Н.С., Эдиев А.У., Липилин Д.А., 2022

Abstract. The popular tourist, excursion and ski centers of Teberda and Dombay are located within the boundaries of the Teberda State Natural Biosphere Reserve (TSNBR). The result of the recreational development of the area was the drying up of the main layer of the endemic dark coniferous forest, which is located in the zone of local natural and climatic processes, transforming under the influence of anthropogenic activity. The degradation of the unique mountain-forest landscape is going. Comprehensive geoecological studies using geochemical, silvicultural-taxation, physical and geographical methods and means of remote sensing (images from the Landsat 8 spacecraft), when comparing the model of air temperature fields with the plan of afforestation and phytocenotic map, made it possible to determine ecological niches for dominants in the model dark coniferous array. The relative gradients of the thermal field of various associations are determined. The areas of forest plots, different in latent heat fluxes, depending on the degree of degradation of the main layer and the nature of the succession process, have been established. The optimal ecological conditions for the vector of natural reforestation have been determined.

Keywords: recreation, tree stand drying out, space images, heat fields, successions, reforestation

For citation: Onischenko V.V., Dega N.S., Ediev A.U., Lipilin D.A. Climatogenic Transformation of Mountain Forest Associations and the Vector of Stable Restorative Successions. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):74-84. (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

Высокая динамичность природных процессов, связанных с интенсивным освоением горных территорий, в значительной степени повышает восприимчивость вековых биогеоценозов. Выявление факторов, влияющих на переформирование природных ландшафтов в горах, позволяет устанавливать механизмы воздействия формирующихся процессов на природные экосистемы в зонах климатических трансформаций и геоэкологического переустройства местных геосистем. При этом необходимо принимать во внимание реальные и гипотетические угрозы рекреационного развития как следствие продолжающегося нерационального управления ресурсами гор.

Недостаточная разработанность методов оценки роли климатических факторов в изменении состава, структуры и пространственного распределения лесных экосистем затрудняет моделирование трансформации лесных сообществ при локальном изменении климатических процессов в контексте рекреационных нагрузок.

В горах КЧР расположены широко известные центры международного туризма и горнолыжного спорта – Домбай, Теберда, Архыз. Общая положительная динамика развития регионального туризма пока не вносит желаемого вклада в социально-экономическое развитие республики.

Одним из показателей перспективности рекреационных территорий следует считать наличие особо охраняемых природных территорий (ООПТ). В Карачаево-Черкесии общая площадь ООПТ составляет свыше 30 % от общей площади республики. Для сравнения: площадь ООПТ на федеральном уровне не достигает 3 % территории РФ. Развитие регионов со значительной площадью ООПТ изначально ориентируется на природно-антропогенную сбалансированность, ООПТ рассматриваются как перспективные внутрирегиональные точки устойчивого роста. Генеральной конференцией ЮНЕСКО в Севилье (1995 г.) была утверждена принципиально новая концепция, поставившая целью биосферного резервата не столько сохранение и изучение нетронутых человеком участков природы, сколько организацию на их территории человеческой деятельности во всей ее полноте, но на принципах природно-сбалансированного (устойчивого) развития [1, 2]. Однако противоречия законодательной базы и экономические интересы хозяйствующих субъектов на территории биосферного резервата неизбежно приводят к конфликтам интересов, что, в свою очередь, отражается на структуре и динамике природных экосистем. Сегодняшний пример – Тебердинский государственный природный биосферный заповедник (ТГПБЗ) – это реакция экосистем в виде усыхающих хвойных массивов леса на допущенные хозяйственные нагрузки в условиях заповедного режима.

Целью данной работы является эколого-географическая оценка трансформации структуры и функционирования горно-лесного ландшафта в рекреационной зоне ТГПБЗ для рационального и устойчивого управления горным природопользованием.

В исследовании данного направления решались следующие задачи:

- оценить пространственное распределение теплового поля с позиций неоднородности сопряженных горно-лесных экосистем;
- произвести сравнительный анализ температуры излучающей поверхности трансформированных лесных сообществ на модельной территории, расположенной в режиме охраны заповедника и под воздействием преобразующихся геофизических процессов рекреационной зоны туристско-горнолыжного центра Домбай;
- установить интегральные особенности теплового эффекта взаимосвязанных фитоценозов с учетом оптимального распределения доминантов (эдификаторов) в комплексах экологических факторов географической среды;
- выявить тепловые аномалии в структуре подстилающей поверхности модельной территории и составить прогноз сукцессии в дальнейшем лесообразовании.

Априори ранее были установлены причины массового усыхания древостоев ели, которое происходит под воздействием аэрозолей и кислотных осадков антропогенного происхождения [3, 4].

Следствием снижения роли заповедного режима становится не только конфликт интересов заповедника с рекреационной эмиссией, но и ослабление охраны заповедника, ухудшение состояния лесного фонда и животного мира.

Схожие работы по экологии, прогнозированию структуры и функционирования лесной растительности в горных условиях на среднемасштабном уровне проводились на Кавказе [5] и Урале [6].

Характеристика района исследования

В качестве модельной территории рассматривался интенсивно усыхающий горно-лесной массив вблизи рекреационно-горнолыжного центра Домбай, который испытывает климатогенное и антропогенное воздействие, связанное с современными процессами несистемного освоения горных территорий, приватизацией земли, стихийным развитием рынка рекреационных услуг (рис. 1).

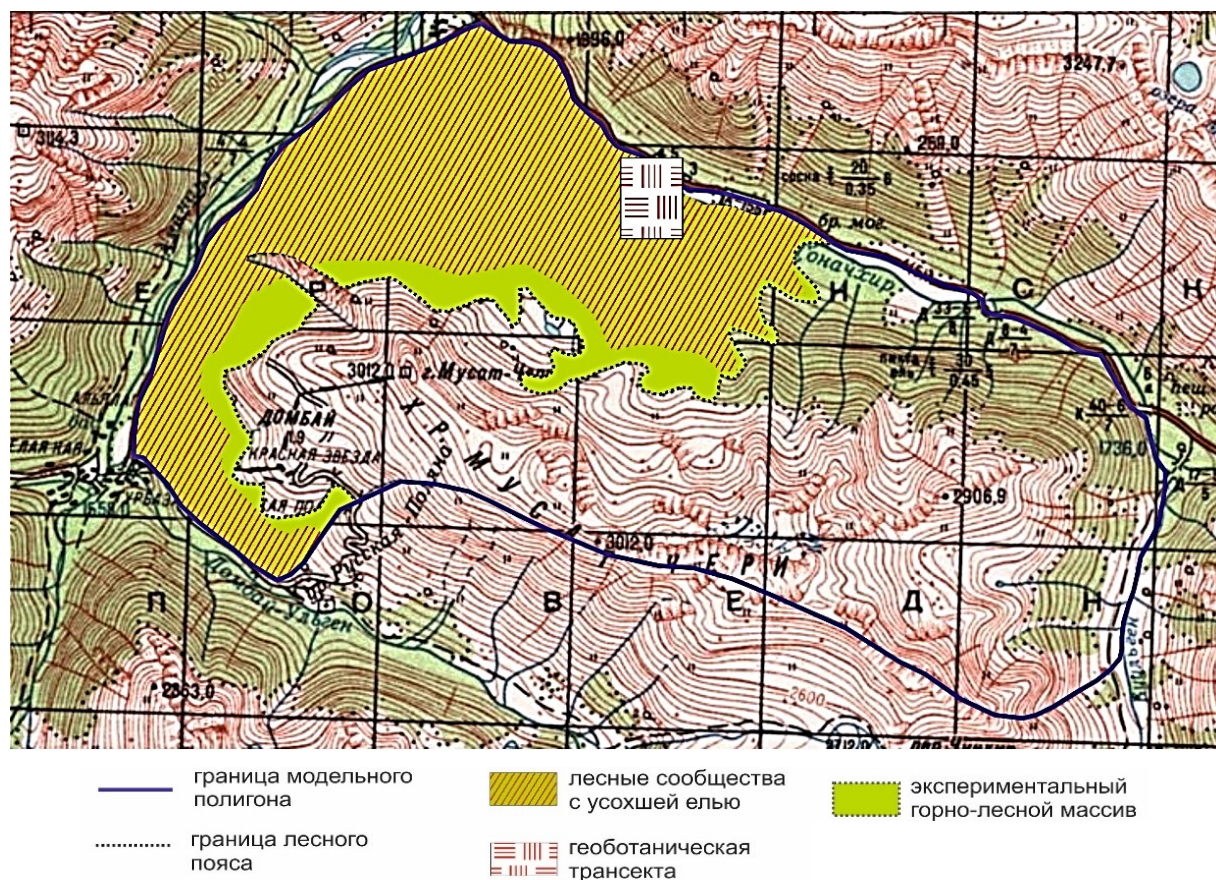


Рис. 1. Горно-лесная территория усохшего темно-хвойного массива в рекреационной зоне ТПБЗ
/ Fig. 1. Mountain-forest territory of a shrunken dark coniferous massif in the recreational zone of the Teberdinsky Reserve

При этом сведена до минимума роль государства как монополиста по контролю за использованием природных ресурсов и географической среды [7]. Домбай стал микрогородом со всеми типичными для урбанизированных центров проблемами.

Структура пихтово-еловых древостоев отличается высокими показателями качества и продуктивности, формируется в сложных геоморфологических элементах горного рельефа, образуя уникальные по рекреационной значимости лесные ландшафты. Они эндемичны и распространены в высотном интервале 1000 м (от 1300 до 2300 м над уровнем моря), выполняют оздоровительные, водорегулирующие, противоэрозионные и эстетические функции в районе интенсивной рекреации. Пихта кавказская и ель восточная очень схожи по своим лесоводственно-таксационным признакам и свободны в конкурентном сосуществовании, в одних случаях занимая доминирующее положение, в других – уступая его.

Материалы и методы исследований

Для достижения поставленной цели исследования, кроме традиционных геоботанических описаний, понадобился сбор, обработка и анализ геоэкологической информации нескольких типов:

- картосхем, составленных на основе многолетних полевых наблюдений, отражающих пространственно-временную организацию типов леса в темнохвойном массиве по показателям микрорельефа, абсолютной высоте, морфологической структуре почв на учетных площадях;
- комплексных описаний вертикальной и горизонтальной структуры ключевых участков по элементам леса на постоянных пробных площадях [8];
- гидротермических данных по четырём основным метеостанциям КЧР (Теберда, Домбай, Архыз, Клухорский перевал);
- серии архивных аэрофотоснимков и мультиспектральных спутниковых снимков, выполненных в разные сезоны года, а также материалов последовательно проведенного лесоустройства в ТГПБЗ;
- данных антропогенной нагрузки в природоохранном режиме ТГПБЗ.

Источником исходной информации послужил также план лесонасаждений ТГПБЗ, масштаба 1:25000. При этом применен сопряженный картографический анализ.

Для оценки влияния факторов среды использовалась информационная статистика, основные принципы и методы которой отражены в ряде работ [9–11].

Центральное место в работе при дешифрировании снимков заняли геоинформационные методы, позволяющие в автоматическом режиме осуществлять сопряженный анализ данных полевых наблюдений с информационной базой дистанционного зондирования и создавать блок-диаграммы, обобщенно представляющие биогеоценотические закономерности модельной территории, подверженной природно-антропогенной трансформации.

Для анализа современной лесотипологической структуры и установления вероятных связей между распространением и свойствами географических компонентов, а также оценки диапазонов климатических характеристик, в пределах которых реализуется современная динамика горно-лесного пояса, модельной территории, использовались цифровые модели рельефа и различные технологии дистанционного зондирования [12].

Методика получения реальных значений температуры подстилающей поверхности при пересчете исходных значений яркости космических снимков на сенсор в значения температуры земной поверхности достаточно распространена [13, 14]. Обработка показателей тепловых каналов Landsat проводится с применением программного комплекса ENVI 5.2.

Построение картографических моделей, отражающих распределение температурного излучения физической поверхностью модельной и сопредельных территорий, выполнено в программе ArcGIS.

На трансформированных лесных территориях, имеющих сходные черты с горящими, целесообразно оценивать степень ущерба и восстановление лесного покрова посредством дистанционного зондирования. Для проведения такого рода анализа исходным материалом могут служить данные спутниковых съемок [15].

Тепловые спутниковые снимки с определенным разрешением позволяют характеризовать пространственно-временное распределение типов лесной растительности, устанавливать тепло-энергетические различия между лесными сообществами и экосистемами [16, 17].

Градиентная структура метеоэлементов (в том числе температуры) горно-лесных экосистем ТППБЗ установлена по данным отдельных метеостанций и постов, что позволяет верифицировать достоверность результатов спутникового зондирования.

Результаты исследований и их обсуждение

К числу экосистем, реагирующих на изменения внешних ситуаций, относится горно-лесной пояс верхней части среднегорий, представленный темнохвойными типами леса, в диапазоне абсолютных отметок от 1450 до 2200 м над уровнем моря. Горные леса верхних высотных уровней произрастают в экстремальных природно-климатических условиях и, подвергаясь существенному воздействию гидрометеорологических и антропогенных факторов, изменяют состав, структуру и характер последующего развития.

В структуре кажущейся однородной среды мезосклонов темнохвойных ценозов проявляется неоднородность в формировании состава древесного полога (эдификаторов) лесных ассоциаций, приуроченных к микросклонам.

В распределении доминантов основного яруса темнохвойного массива по интервалам высот не наблюдается строгой закономерности. Ель восточная как доминант встречается на всех отметках мезосклона. Однако наиболее адаптирована в высотных интервалах 1400–1600 и 1800–2000 м. Нередко доминирующий состав елово-пихтовых древостоев сформирован одинаковыми (по 50 %) долями участия пихты и ели.

Из табл. 1 следует, что распределение площади лесного массива по доминантам древесного яруса зависит от экспозиции склона. На западной экспозиции урочища Аманауз в роли доминанта встречается сосна, не участвующая в основном составе темнохвойного леса на северном склоне урочища Гоначхир. Отмечается незначительное представительство летне-зеленых сообществ в виде островов в эрозионных врезках.

Таблица 1 / Table 1

Распределение древостоев по площадям распространения доминантов основного яруса на модельной территории, % / Distribution of pedestals by areas of distribution of dominants of the main tier in the model territory, %

Урочище	Экспозиция мезосклона	Пихта	Ель	Сосна	Береза	Осина	Клен	Ольха
Аманауз	Западная	45	19	18	8	6	2	2
Гоначхир	Северная	31	41	–	9	6	5	8

В связи с неблагоприятными погодными условиями не всегда удастся использовать совокупность данных Landsat 8 для одной и той же сцены, которые формируются 1 раз в 16 дней. Наше исследование распределения тепловых полей проведено на основе доступных снимков по сезонам 2019 г. со спутника Landsat 8 в ясную солнечную погоду или при минимальной облачности. Общая структура тепловых полей практически неизменна. Поскольку усыхание темнохвойных насаждений на данном участке находится в интенсивной (неустоявшейся) фазе, применение многолетних космических снимков нецелесообразно.

Оценка взаимосвязи значений температуры подстилающей поверхности по спутниковым снимкам и реальной температуры свидетельствует о соответствии результатов дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне параметрам теплового поля отражающих поверхностей [18, 19].

По расчетам теплового излучения исследуемого горно-лесного полигона 08.08.2019 г. (рис. 2) диапазон изменения излучаемой температуры горно-лесными сообществами составил от 12 до 27 °С с градацией 3 °С.

Пространственное распределение структуры лесных сообществ с усохшей елью, при использовании спектрального анализа теплового поля, по материалам дистанционного зондирования Landsat, характеризует современный этап его трансформации в зоне локальной атмосферной турбулентности и влияния рекреационно-хозяйственной деятельности туристско-горнолыжного

центра Домбай. Установлена степень вариации спектральных характеристик излучаемой подстилающей поверхностью (пологом) модельной территории по тепловым различиям между фоновыми и преобразованными растительными группировками в цифровой модели рельефа.

Показатели теплового поля, как и следовало ожидать, дифференцированы в зависимости от структуры подстилающей поверхности. На большей части исследуемой территории преобладает температура поверхности от 14 до 17 °С – это площади от нижней границы субальпийского пояса до подножий северных и западных склонов долин. Температурные поля ниже 12 °С распределяются по высотным поясам выше границы леса. Полог темнохвойного массива в значительной степени изменен усохшими еловыми древостоями. Это нашло отражение в структуре и распределении тепловых полей.

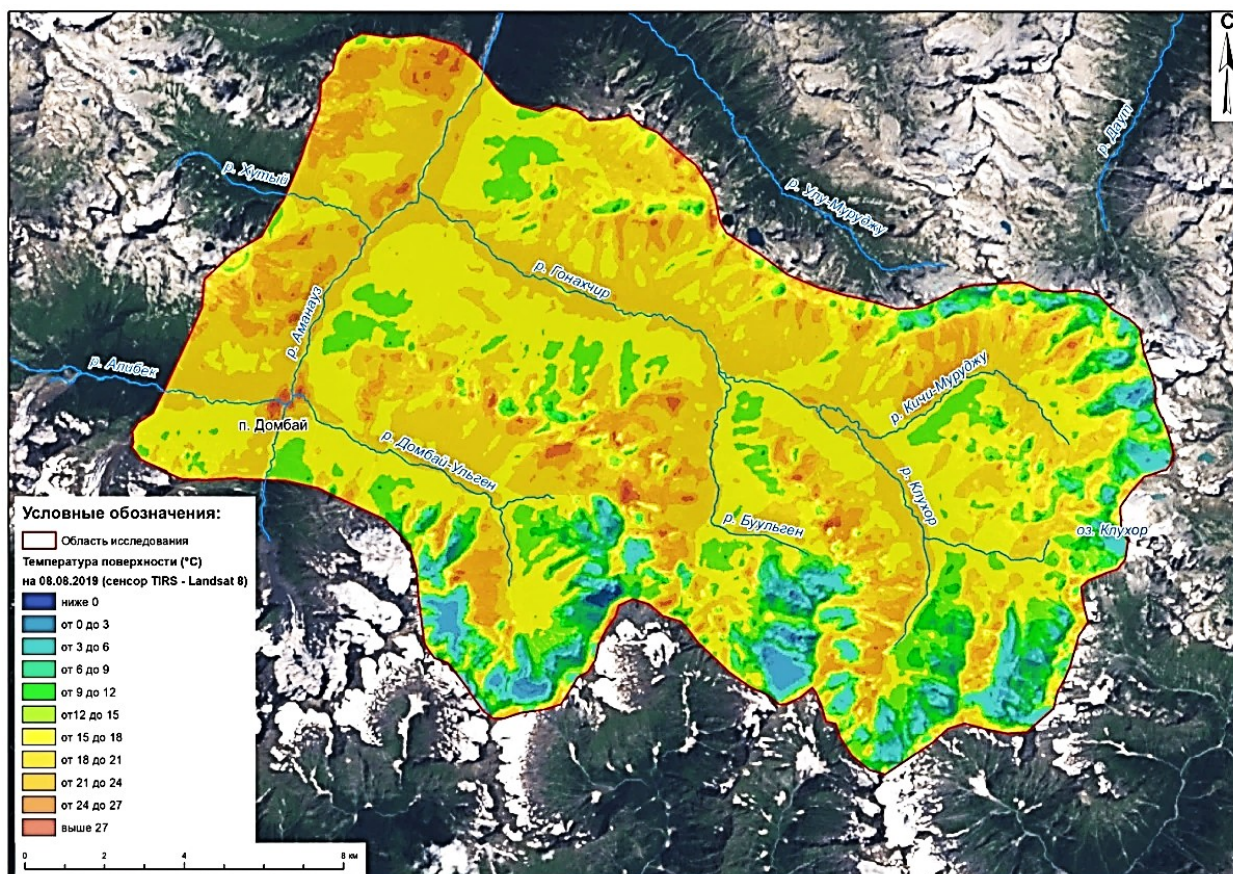


Рис. 2. Распределение теплового поля в природно-рекреационной зоне ТГПБЗ (по космоснимку, 08.08.2019) / Fig. 2. Distribution of the thermal field in the natural recreational zone of the Teberda nature reserve (according to the satellite image, 08.08.2019)

Полог фонового темнохвойного массива, не затронутого усыханием ели, обладает большей тепловой обеспеченностью, от 18 до 27 °С по склонам. В единичных случаях даже превышая верхний температурный уровень. Градиент изменения температуры в среднем составляет 0,9–1,0 °С – сухоадиабатический. Однородность естественного полога леса определяет сравнительно закономерное распределение тепловых полей в рельефе. В летний период темнохвойный полог леса аккумулирует больше тепла, чем иные лесные поверхности, в том числе полог с усохшей елью, а следовательно, его излучающая способность выше.

Изреженный полог с усохшими ельниками обладает меньшей отражательной способностью поступающего тепла. Диапазон распределения теплового поля в зоне усохших ельников – от 12 до 18 °С, с вертикальным градиентом 0,4–0,6 °С на каждые 100 м абсолютной высоты, т.е. наблюдается весьма существенное изменение экологической ситуации.

На отдельных участках лесного массива и территории поселка Домбай излучаемое тепло превышает 27 °С. Вероятно, здесь проявляется связь с защищенностью от влияния охлаждающих

воздушных потоков с Главного хребта, ледники которого значительно отступили, или особенностями условий микрорельефа и освоенностью территории. Верхняя граница лесных сообществ с температурой излучения 24–27 °С расположена на высоте, близкой к 2100 м над уровнем моря, где граница темнохвойного леса сменяется субальпийской растительностью. В этом же высотном уровне встречаются растительные сообщества с пониженной обеспеченностью тепла – от 12 до 18 °С, на северной и северо-восточной экспозициях с изреженными криволесьями и роскошными зарослями рододендрона кавказского.

В целом площади, занятые лесными сообществами, с температурной обеспеченностью от 14 до 17 °С и от 17 до 21 °С составляют соответственно 53 и 42 % (рис. 3) от общей территории исследуемого полигона. Учитывая особенности теплоемкости фоновых темнохвойных насаждений и преобразованных с усохшей елью, становится очевидной деградация основного древесного яруса на модельном полигоне, примыкающем к рекреационному комплексу Домбай. Площадь насаждений с усохшими древостоями, где ель в роли доминанта состава, превышает площадь распространения сохранившихся темнохвойных древостоев на 11 %. При этом вся площадь, занимаемая темнохвойными типами леса на полигоне, составляет 95 %. С увеличением абсолютной высоты отражение температуры подстилающей поверхности закономерно снижается, что может свидетельствовать о понижении баланса солнечной радиации [20]. Различие в градиентной структуре тепловых полей может свидетельствовать об изменении характера лесообразования на участках с усохшими ельниками.

Изменение тепловых полей в горном лесном массиве может указывать на другие характерные особенности, такие как последовательность смены почвенно-гидрологических условий, геоморфологических форм микрорельефа от выпуклых к вогнутым, и наоборот, или переформирование почвенного покрова. Типы леса в едином лесном массиве успешно соединяют температурные поля по высотам и экспозициям в мозаике распространения лесорастительных условий с различной структурой преобразованной растительности. В пределах модельного темнохвойного массива они объединены в единое целое и демонстрируют эколого-географические взаимосвязи между водой, почвой и растительностью – тремя основными компонентами горного лесообразования.

Согласно распределению тепла различные типы преобразованных лесных ассоциаций, несмотря на однородность, имеют меньшие значения температуры относительно поверхности фоновых фитоценозов, таким образом, обеспечивая значительные потоки скрытого тепла, поддерживающие влагооборот между поверхностью трансформированных ценозов и атмосферой [21].

Структура исследуемого температурного поля в зимних условиях имеет весьма существенные отличительные черты, которые, прежде всего, связаны с распределением снежного покрова в преобразованном пологе.

Диапазон территориальной изменчивости температуры подстилающей поверхности модельной территории зимой составляет от –3 до –12 °С. Температурные контрасты ниже –12 °С характерны для высокогорных поясов, выше границы леса. Пространственное распределение температурных полей в зимний период сопоставимо с излучаемым теплом подстилающей поверхностью летом. Различие отражаемой температуры зимой наблюдается в зоне усохших еловых древостоев, где изменение верхнего полога темнохвойных типов леса влияет на излучаемое тепло. При этом чем больше доля участия усохшей ели в составе основного яруса темнохвойных насаждений, тем ниже тепловое поле. Развитие сукцессий по потоку скрытого тепла в зимний период соответствует степени изреживания основного полога из-за усыхания.

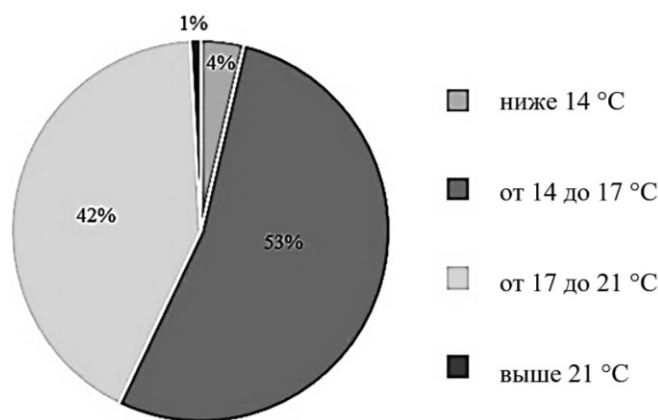


Рис. 3. Деление территории области исследования по температуре поверхности (по космоснимку, 08.08.2019)
/ Fig. 3. Dividing the territory of the research area by surface temperature (according to satellite image, 08.08.2019)

Значения температурного эффекта для вторично сукцессионных лесных ассоциаций снижаются в ряду фоновых типов подстилающей поверхности, т.е. вторично сукцессионные лесные сообщества обеспечивают увеличение потоков скрытого тепла по сезонам года.

На профиле теплого поля модельного массива отображены отдельные участки с наибольшими среди выделенных типов леса значениями температуры – «острова тепла». Эти максимальные значения отмечены на территории туристско-горнолыжного комплекса Домбай и пойменных участках исследуемой территории [22].

Результаты обработки показателей тепловых каналов Landsat с применением геоинформационных методов позволяют отождествлять лесоводственно-таксационную структуру фоновых древостоев основного яруса с сообществами, включающими усохшую ель, и устанавливать степень трансформации лесного массива.

Летнее отражающееся тепло менее контрастно выражено в структуре дифференцированного теплового поля исследуемой подстилающей поверхности – лесного полога, чем зимнее. Сглаженные формы рельефа склонов с ускоренным таянием снега и лесной растительностью старших возрастных сукцессий аккумулируют температурные поля зимой в диапазоне от –6 до –9 °С. Дальнейшее снижение температурных полей происходит в условиях меняющейся морфологии рельефа, абсолютной высоты и структуры лесного покрова в сравнительно более низких возрастных стадиях.

Зимнее состояние теплового поля характеризуется сдвигом изотерм, сужающих границы тепловых эффектов отдельных типов леса. В летний период тепловые границы, напротив, расширяются. Сезонная динамика тепловых полей позволяет не только уточнять границы усыхания ели в пределах модельного массива, но и устанавливать сроки продолжительности вегетации.

По мнению отдельных авторов [23], климатический режим типа леса не является определяющим в его распространении. Формирование микроклиматических условий зависит от структуры растительного покрова, деформаций микрорельефа и даже от отдельных сопредельных растительных группировок. Сложная мозаика горных климатических режимов и типов растительного покрова определяется в основном ориентированием и крутизной склонов и в меньшей степени превышением и окружающим рельефом.

Нами рассчитаны меры одноканальных связей и сопряженности между факторами среды и доминантами лесных ценозов [9, 11]. По материалам полевых исследований и лесоустройства установлен характер распространения и оптимумы произрастания доминантов лесных ценозов модельного полигона (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Оптимальные условия произрастания доминантов лесных сообществ
 / Optimal growing conditions for the dominants of forest communities**

Фактор среды	Пихта	Ель	Сосна	Береза	Осина	Ольха	Клен	Бук
Высота над уровнем моря, м	1400–2200	1400–2000	1800–2200	1600–2000	1400–1700	1400–1700	1400–1600	1500–2000
Экспозиция	Ц	С; С-3	З; С-3	С; З	С; С-3; З	Ровный	З; С-3	С; З; С-3
Крутизна склона, °	<5; 20–40	0–30	0–40	20–30	5–20	0–5	10–20	5–30
Механический состав почвы	Супесчаная, суглинистая	Песчаная, суглинистая	Супесчаная, суглинистая	Суглинистая	Супесчаная, суглинистая	Песчаная	Супесчаная, суглинистая	Легкий суглинок
Влажность почвы	Свежая	Свежая	Сухая	Сырая	Свежая	Сырая	Свежая	Свежая
Мощность почвы	Средняя, мощная	Малая, средняя	Малая	Малая	Средняя	Малая, средняя	Средняя	Средняя
Скелет почвы	Каменная, скальная	Каменная	Щебнистая, скальная	Щебнистая, каменная	Каменная скальная	Каменная	Каменная	Каменная

В данных условиях конкуренции стратегия формирования типов леса в большей степени проявляет свойства виолентности [24]. В связи с этим исследуемый лесной массив весьма разнообразен в формировании лесных ассоциаций, которые могут расти в разных условиях по типу сложности и т.д. В то же время эти ряды представляют и сукцессионные серии смен при изменении условий существования (в том числе и температурных полей) в соответствующем направлении.

Заключение

По результатам исследования горно-лесного массива, на основании анализа данных структуры и динамики лесных сообществ, трансформирующихся с усыханием елового древостоя основного яруса, установлен характер деградации эндемичного лесного ландшафта из климаксного состояния в динамичный горно-лесной экотон вторичных сукцессий.

Площадь деградации лесного темнохвойного массива с различной степенью усохших еловых древостоев составила свыше 50 % от общей площади модельного экотона.

Согласно распределению температурных полей различные типы преобразованных лесных ассоциаций имеют меньшие значения температуры относительно фоновых фитоценозов, т.е. обеспечивают большие потоки скрытого тепла, поддерживающие влагооборот между поверхностью трансформированных ценозов и атмосферой. При этом развитие сукцессий по потоку скрытого тепла соответствует вторично сукцессионным процессам, когда в конкурентных условиях темнохвойный подрост вытесняет летне-зелёные сообщества, образовавшиеся под пологом постепенно разреживающихся коренных (климаксных) древостоев. Процесс восстановления утерянного эндемичного горно-лесного ландшафта в новой формации продлится не менее трех классов возраста (для хвойных пород – 60 лет).

Весьма важным условием восстановления и устойчивого функционирования коренного массива является сохранение приуроченности определенных доминантов (эдификаторов) типов леса к установленным комплексам оптимального сочетания экологических факторов географической среды.

Список источников

1. Яроцкая Е.В. Ресурсный потенциал регионов как основа их устойчивого развития // Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы пятой Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Томск, 2016. С. 44–55.
2. Мищенко А.А., Волкова Т.А. Альтернативные виды природопользования как фактор устойчивого развития горных территорий // Кавказ и Альпы в сравнительном аспекте : сб. науч. тр. Междунар. совмест. летней школы. Краснодар, 2014. С. 26–31.
3. Байчорова Э.М., Дега Н.С., Онищенко В.В., Эрикенов С.-Б.М. Атмосферные примеси и здоровье населения – геоэкологический императив устойчивого развития горной Карачаево-Черкесии // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10, № 3(37). С. 358–365. Doi: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-358-365.
4. Дега Н.С., Онищенко В.В., Петропавловский Б.С. Влияние техногенной трансформации воздушной среды на устойчивость хвойных лесов Карачаево-Черкесии // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 1, № 1 (35). С. 69–76. Doi: 10.21177 / 1998-45-02-2018-10-1-69-76.
5. Onishchenko V.V., Dega N.S., Bajchorova E.M. Geocological Assessment and Quality Protection of Natural-Anthropogenic Geosystems in Karachay-Cherkessia // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). 2019. Vol. 1. P. 90–96. Doi.org/10.2991/Isees-19.2019.19.
6. Шиятов С.Г., Моисеев П.А., Григорьев А.А. Мониторинг климатогенной динамики высокогорной древесной растительности при помощи ландшафтных фотоснимков на Южном Урале // Вопросы географии. 2014. № 137. С. 125–155.
7. Гуня А.Н. Ландшафтные основы анализа природных и природно-антропогенных изменений высокогорных территорий. Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2010. 200 с.
8. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесная промышленность, 1971. 510 с.
9. Пузаченко Ю.Г., Петропавловский Б.С., Скулкин В.С. Статистические модели геосистем и их компонентов // Моделирование элементарных геосистем. Иркутск, 1975. С. 104–116.
10. Киселев А.Н. Методика крупномасштабного прогнозного картографирования растительности горных территорий (на примере лесной растительности Среднего Сихотэ-Алиня) // Геоботаническое картографирование. Л., 1979. С. 8–21.

11. Петропавловский Б.С., Семкин Б.И., Усольцева Л.А. Опыт изучения устойчивости типов растительности в планетарном масштабе для целей фонового мониторинга окружающей среды // Опыт и методы экологического мониторинга. Пушино, 1978. С. 60–63.
12. Kuzyakina M., Gura D., Sekisov A., Granik N. Assessment of Potential Forest Biomass Resource on the Basis of Data of Air Laser Scanning // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983. P. 403–416. Doi: 10.1007/978-3-030-19868-8_41.
13. Landsat 8. Data Users Handbook. URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook> (дата обращения: 17.12.2019).
14. Погорелов А. В., Литилин Д.А. Тепловой «портрет» города Краснодара по данным спутниковых снимков // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 4.1. С. 32–45.
15. Huttich C., Stelmaszczuk-Gorska M.A., Eberle J., Kotzerke P., Schmillius C. Operational forest monitoring in Siberia using multi-source earth observation data // *Siberian J. Forest Science*. 2014. Vol. 1, № 5. P. 38–52.
16. Voogt J.A., Oke T.R. Termal remote sensing of urban climates // *Remote Sens. Environ.* 2003. № 86 (3). P. 370–384.
17. Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Otlle C., Breon F.-M., Nan H., Zhou L., Myneni R.B. Surface urban heat island across 419 global big cities // *Environmental Science and Technology*. 2011. № 46. P. 696–703.
18. Niclos R., Valente J.A., Barbera M.J., Caseles V. Land Surface Air Temperature Retrieval From EOS-MODIS Images // *IEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. Vol. 11, № 8. P. 1380–1384.
19. Грищенко М.Ю., Чернулич К.К. Расчет значений температуры воздуха по значениям температуры земной поверхности, полученным по тепловым снимкам (на примере Южно-Курильского района) // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы 11-й Междунар. научн. конф. Красноярск, 2015. С. 251–255.
20. Лурье П.М., Крохмаль А.Г., Панов В.Д., Панова С.В., Тамов М.Ч. Карачаево-Черкесия: климатические условия. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 2000. 196 с.
21. Бортовский З.В. Температурующая функция ландшафтов в таежной зоне по данным дистанционного зондирования (на примере Вологодской области) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 215–224.
22. Antipceva J., Volkova T., Lipilin D., Yarotskaya E. Tourist potential of specially protected areas of the Black Sea coast // *Mediterranean Coastal Foundation*. Mugla Turkey, 2019. P. 233–240.
23. Barry R.G. Climate Change in Mountains. The State of the World's Mountains. London: Zed Books, 1992. P. 359–380.
24. Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижов О.Н., Антипин Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозиздат, 1956. 472 с.

References

1. Yarotskaya E.V. Resource potential of regions as the basis of their sustainable development. *Investments, construction and real estate as a material basis for modernization and innovative development of the economy. Materials of the fifth All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation*. Tomsk, 2016:44-55. (In Russ.).
2. Mishchenko A.A., Volkova T.A. Alternative types of nature management as a factor of sustainable development of mountain territories. *Caucasus and the Alps in a comparative aspect. Collection of scientific articles of the International Joint Summer School*. Krasnodar, 2014:26-31. (In Russ.).
3. Baichorova E.M., Dega N.S., Onishchenko V.V., Erikenov S.-B.M. Atmospheric impurities and public health - geoecological imperative of sustainable development of mountainous Karachay-Cherkessia. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018;10(3):358-365, doi: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-358-365. (In Russ.).
4. Dega N.S., Onishchenko V.V., Petropavlovskii B.S. Influence of technogenic transformation of the air environment on the stability of coniferous forests of Karachay-Cherkessia. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018;1(1):69-76, doi: 10.21177 / 1998-45-02-2018-10-1-69-76. (In Russ.).
5. Onishchenko V.V., Dega N.S., Bajchorova E.M. Geoecological Assessment and Quality Protection of Natural-Anthropogenic Geosystems in Karachay-Cherkessia. *Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST)*. 2019;1:90-96, doi.org/10.2991/Isees-19.2019.19.
6. Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Grigoriev A.A. Monitoring of climatogenic dynamics of high-altitude woody vegetation using landscape photographs in the Southern Urals. *Voprosy geografii = Questions of Geography*. 2014;(137):125-155. (In Russ.).
7. Gunya A.N. *Landscape fundamentals of analysis of natural and natural-anthropogenic changes in high-altitude territories*. Nalchik: KBSC RAS Press; 2010. 200 p. (In Russ.).
8. Anuchin N.P. *Forest taxation*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1971. 510 p. (In Russ.).

9. Puzachenko Yu.G., Petropavlovskii B.S., Skulkin V.S. Statistical models of geosystems and their components. *Modeling of elementary geosystems*. Irkutsk, 1975:104-116. (In Russ.).
10. Kiselev A.N. Methodology for large-scale predictive mapping of vegetation in mountain areas (on the example of forest vegetation in the Middle Sikhote-Alin). *Geobotanical mapping*. Leningrad, 1979:8-21. (In Russ.).
11. Petropavlovskii B.S., Semkin B.I., Usoltseva L.A. Experience in studying the stability of vegetation types on a planetary scale for the purposes of background environmental monitoring. *Experience and methods of environmental monitoring*. Pushchino, 1978:60-63. (In Russ.).
12. Kuzyakina M., Gura D., Sekisov A., Granik N. Assessment of Potential Forest Biomass Resource on the Basis of Data of Air Laser Scanning. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019;983: 403-416, doi: 10.1007/978-3-030-19868-8_41.
13. *Landsat 8. Data Users Handbook*. Available from: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook> [Accessed 17th December 2019].
14. Pogorelov A.V., Lipilin D.A. Thermal "portrait" of the city of Krasnodar according to satellite images. *Vestn. Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika = PNRPU Bulletin, Applied ecology. Urban development*. 2016;(4.1):32-45. (In Russ.).
15. Huttich C., Stelmaszczuk-Gorska M.A., Eberle J., Kotzerke P., Schmullius C. Operational forest monitoring in Siberia using multi-source earth observation data. *Siberian J. Forest Science*. 2014;1(5): 38-52.
16. Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ*. 2003;(86):370-384.
17. Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Otle C., Breon F.-M., Nan H., Zhou L., Myneni R.B. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science and Technology*. 2011;(46):696-703.
18. Niclos R., Valente J.A., Barbera M.J., Caseles V. Land Surface Air Temperature Retrieval From EOS-MODIS Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014;11(8):1380-1384.
19. Grishchenko M.Yu., Chernulich K.K. Calculation of air temperature values according to the values of the earth's surface temperature obtained from thermal images (for example, the South Kuril region). *Regional Problems of Earth Remote Sensing. Materials of the 11th International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, 2015:251-255. (In Russ.).
20. Lur'e P.M., Krokhmal' A.G., Panov V.D., Panova S.V., Tamov M.Ch. *Karachay-Cherkessia: climatic conditions*. Rostov-on-Don: Rostov State University Press; 2000. 196 p. (In Russ.).
21. Bortovskii Z.V. Thermal regulation function of landscapes in the taiga zone according to remote sensing data (on the example of the Vologda region). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2017;14(3):215-224. (In Russ.).
22. Antipceva J., Volkova T., Lipilin D., Yarotskaya E. Tourist potential of specially protected areas of the Black Sea coast. *Mediterranean Coastal Foundation*. Mugla Turkey, 2019:233-240.
23. Barry R.G. *Climate Change in Mountains. The State of the World's Mountains*. London: Zed Books Publ.; 1992:359-380.
24. Ramenskii L.G., Tsatsenkin I.A., Chizhov O.N., Antipin N.A. *Ecological assessment of forage lands by vegetation cover*. Moscow: Sel'khozizdat Publ.; 1956. 472 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В.В. Онищенко – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования.

Н.С. Дега – кандидат географических наук, доцент, заведующая научно-исследовательской лабораторией геоэкологического мониторинга.

А.У. Эдиев – кандидат биологических наук, доцент, декан естественно-географического факультета.

Д.А. Липилин – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры геоинформатики.

Information about the authors

V.V. Onischenko – Doctor of Science (Geography), Professor, Head of Department of Ecology and Nature Management.

N.S. Dega – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Head of Scientific Research Lab of the Geoecological Monitoring.

A.U. Ediev – Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Dean of the Faculty of Natural Geography.

D.A. Lipilin – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Associate Professor of Department of Geoinformatics.

*Статья поступила в редакцию 15.03.2022; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 15.03.2022; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 16.05.2022.*

Научная статья

УДК 551.26+ 552.321.6 (470.621)

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-85-92

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС АПОГИПЕРБАЗИТОВ ЗОНЫ ПЕРЕДОВОГО ХРЕБТА БОЛЬШОГО КАВКАЗА

Юрий Витальевич Попов^{1✉}, Ольга Евгеньевна Пустовит², Сергей Васильевич Левченко³

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

²ООО «ГеоБазисПроект», Ростов-на-Дону, Россия

¹popov@sfedu.ru✉

²olpustovit@mail.ru

³levcherko@sfedu.ru

Аннотация. Апогипербазитовые комплексы являются важными индикаторами геодинамических обстановок, их особенности указывают как на состав мантийного субстрата, так и на параметры корового метаморфизма. В структуре складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа апогипербазиты связаны преимущественно с герцинской структурно-тектонической зоной Передового хребта, где основной объем серпентинитов условно относят к позднему протерозою и объединяют в беденский комплекс. Электронно-зондовые и рентгенофазовые исследования серпентинитов и аксессуарных хромитинелей позволяют определить принадлежность протолита к деплитуированному субстрату геодинамического комплекса супра- и надсубдукционных зон (SSZ) и указывают на его связь с дунит-гарцбургитовыми массивами. Состав мантийных хромитинелей изменяется от хромититового со значениями Cr# 0,36–0,43, Mg# 0,66–0,72 (в Нижнетебердинском массиве) до субферрихромитов – хромитов (в Даховском массиве), что соответствует офиолитовому тренду. При эксгумации зонированные зерна мантийного состава сохранились частично, поскольку после перекристаллизации они интенсивно перерабатываются гидротермальными растворами с образованием микропористых и «атолловых структур». Серпентиниты хризотил-антигоритового и антигоритового состава характерны для южной части Передового хребта; к северу распространены менее высокотемпературные lizardite-хризотилитовые ассоциации. Петрографические особенности изученных серпентинитовых массивов зоны Передового хребта Большого Кавказа сближают их с массивами Центрального пояса и Восточно-Уральской мегазоны Южного Урала.

Ключевые слова: Нижнетебердинский массив, Даховский массив, Кишинский массив, Беденский массив, серпентинит, хромитинелиды

Для цитирования: Попов Ю.В., Пустовит О.Е., Левченко С.В. Геодинамический комплекс апогипербазитов зоны Передового хребта Большого Кавказа // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 85–92.

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

Original article

GEODYNAMIC COMPLEX OF APOHYPERBASITES OF THE ZONE OF THE PEREDOVOY RIDGE OF THE GREATER CAUCASUS

Yurii V. Popov^{1✉}, Olga E. Pustovit², Sergej V. Levchenko³

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

²Geobasis Project, Rostov-on-Don, Russia

¹popov@sfedu.ru✉

²olpustovit@mail.ru

³levcherko@sfedu.ru

© Попов Ю.В., Пустовит О.Е., Левченко С.В., 2022

Abstract. Apohyperbasite complexes are important indicators of geodynamic settings, their features indicate both the composition of the mantle substrate and the parameters of crustal metamorphism. In the structure of the folded-boulder structure of the Greater Caucasus, apohyperbasites are mainly associated with the Hercynian structural-tectonic zone of the Peredovoy Range, where the bulk of serpentinites is conventionally attributed to the late Proterozoic and combined into the Bedene complex. Electron probe and X-ray phase analyzes of serpentinites and accessory chromespinelides make it possible to determine whether the protolith belongs to the depleted substrate of the geodynamic complex of supra- and oversubduction zones (SSZ) and indicate its connection with dunite-harzburgite massifs. The composition of mantle chromespinelides varies from picotite with values of Cr# 0.36-0.43, Mg# 0.66-0.72 (in the Nizhneteberdinsky massif) to subferrichromite - chromites (in the Dakhovsky massif), which corresponds to the ophiolitic trend. During exhumation, the zoned grains of the mantle composition were partially preserved, since after recrystallization they are intensively processed by hydrothermal solutions with the formation of microporous and atoll structures. Serpentinites of chrysotile-antigorite and antigorite composition are typical for the southern part of the Peredovoy Range; less high-temperature lizardite-chrysotile associations are common to the north. Petrographic features of the studied serpentinite massifs of the zone of the Peredovoy Range of the Greater Caucasus make them similar to the massifs of the Central Belt and the East Ural megazone of the Southern Urals.

Keywords: Nizhneteberdinsky massif, Dakhovsky massif, Kishinsky massif, Bedensky massif, serpentinite, chrome-spinelides

For citation: Popov Yu.V., Pustovit O.E., Levchenko S.V. Geodynamic Complex of Apohyperbasites of the Zone of the Peredovoy Ridge of the Greater Caucasus. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):85-92. (In Russ.).

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

Геодинамические комплексы, определяемые как ассоциации горных пород формационного уровня с присущими им характерными деформациями и метаморфическими преобразованиями, выступают важнейшим индикаторами эволюции крупных тектонических структур. К числу наиболее информативных ассоциаций для реконструкции ранних этапов становления структур принадлежат офиолитовые апогипербазиты, характеризующие как особенности мантийного субстрата [1–4], так и параметры корового метаморфизма [5, 6]. В структуре складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа апогипербазиты связаны преимущественно с герцинской структурно-тектонической зоной Передового хребта. Серпентинитовые массивы, условно относимые к позднему протерозою и объединенные в беденский комплекс, локализованы в зонах крупных разломов, ограничивающих блоки (террейны) герцинского кристалликума, и ассоциируют с пластинами допозднепалеозойских тектонических покровов.

До настоящего времени предметом дискуссий являются формационная принадлежность, состав протолита и геодинамическая обстановка формирования апогипербазитов. Необходимой основой для решения этих вопросов выступают данные о минералого-петрографических особенностях пород.

Методы исследований

Сложность интерпретации кавказских апогипербазитов связана с практически полной их серпентинизацией, приведшей к утрате исходного минерального состава и структурно-текстурных особенностей, а также значительной дислоцированностью пород, часто превращенных в серпентинитовый меланж. Для изучения минералого-петрографических особенностей апогипербазитов использован комплекс методов, включающих электронно-зондовые исследования (на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA II LMU с системами микроанализа INCA ENERGY 450/XT и INCA Wave 70) и рентгенофазовый анализ (на дифрактометре ARLX'TRA; характеристическое излучение $\text{CuK}\alpha_1$ 1,5406 Å, $\text{CuK}\alpha_2$ 1,5444 Å). Объектами исследований послужили главным образом Беденский, Даховский, Кишинский и Нижнетебердинский серпентинитовые массивы.

Минералого-петрографические особенности пород и факторы их формирования

В большинстве опубликованных и фондовых работ состав серпентинитов, ассоциирующих с комплексами кристалликума Передового хребта, определяется как хризотил-антигоритовый, наследующий перидотитовый протолит [7]. Вместе с тем прецизионные исследования указывают на более разнообразный состав [8, 9], варьирующий от хризотил-лизардитового до антигоритового, что указывает на различие условий серпентинизации.

Серпентиниты с мелкопетельчатой зональной секториальной структурой, образованной ячейками лизардита и шнурами состава β -лизардит \pm хризотил с пылевидными выделениями магнетита, и лизардит-хризотилловые с крупнопетельчатой секториальной структурой и шовными шнурами хризотила с магнетитом характерны для Даховского и Нижнетебердинского массивов. Такие структурные и минеральные особенности позволяют относить их к претерпевшим низкотемпературную серпентинизацию, соответственно, фреатического и аллометаморфического типа [5]. Тектонические линзы лизардит-хризотилловых разностей ассоциируют с хризотил-антигоритовыми, обычно приуроченными к проницаемым для гидротермальных растворов трещинам и разломам. В составе Беденского массива мелкопетельчатые лизардит-хризотилловые серпентиниты встречаются в подчиненном количестве среди хризотил-антигоритовых. При этом дифракционные исследования указывают на присутствие хризотилоидов (рис. 1), образование которых обычно обусловлено повышением щелочности гидротермальных растворов в ходе фреатической β -лизардитизации [5]. В составе Кишинского массива серпентиниты отличаются спутанно-волокнистыми и пластинчатыми структурами и хризотил-антигоритовым (\pm брусит, хлорит) составом, местами переходящим в антигоритовый. Аллометаморфическая антигоритизация практически полностью нивелировала особенности первичного состава пород.

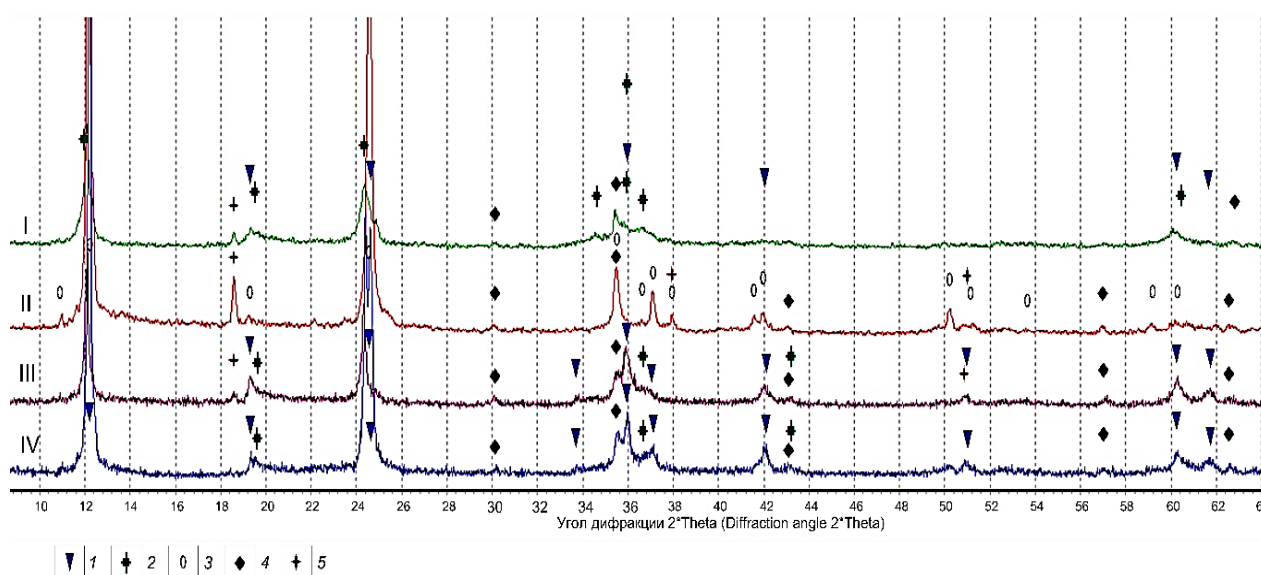
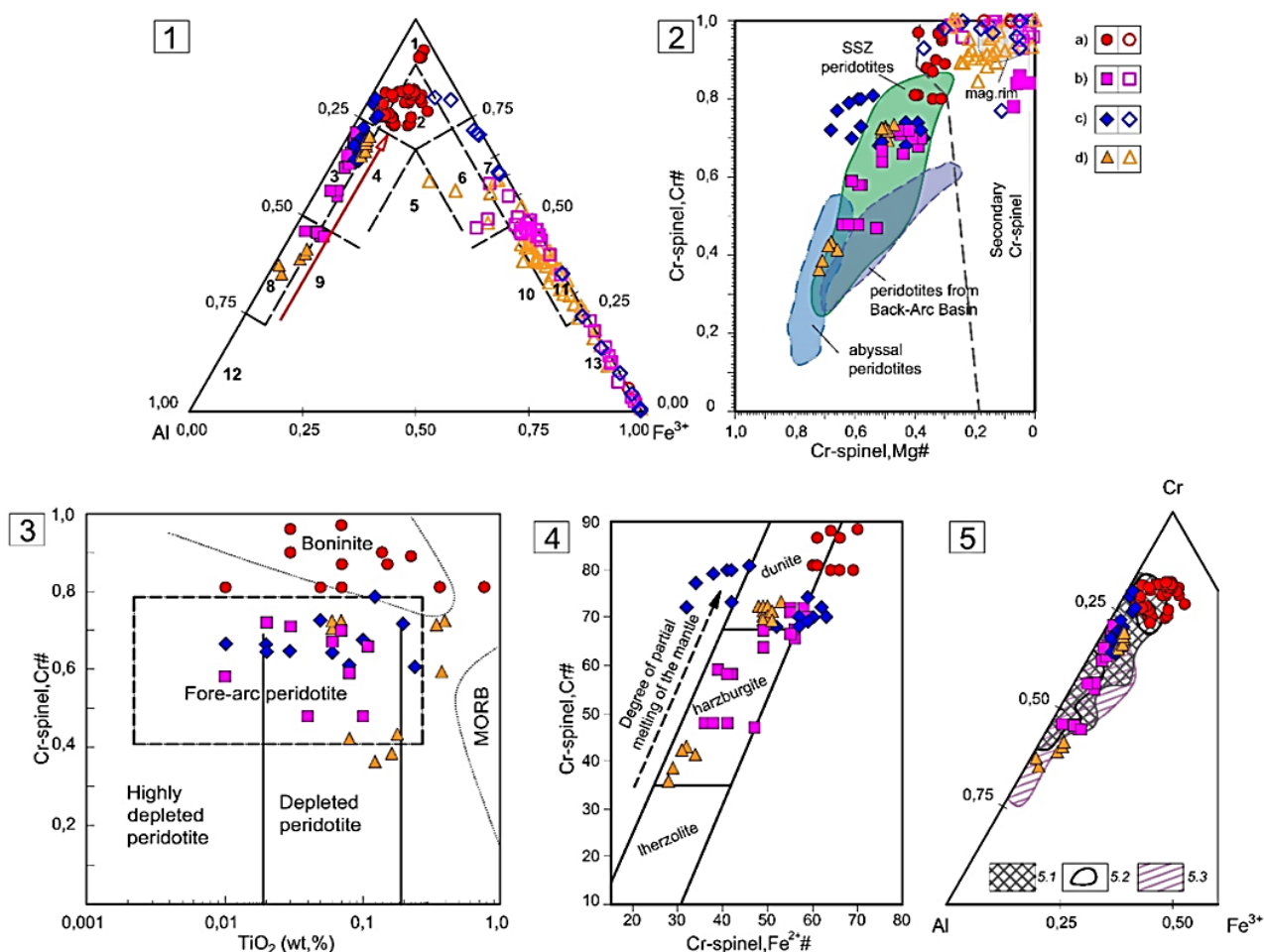


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа серпентинитов: I – Нижнетебердинский массив (образец № 20603-2); II – Кишинский массив (образец № 20102-1); III – Беденский массив (образец № 20513-21); IV – Даховский массив (образец № 12221-7). Указаны рефлексы фаз: 1 – лизардит; 2 – хризотил; 3 – антигорит; 4 – магнетит; 5 – брусит / Fig. 1. Results of X-ray phase analysis of serpentinites: I – Nizhneteberdinsky massif (sample No. 20603-2); II – Kishinsky massif (sample No. 20102-1); III – Bedensky massif (sample No.20513-21); IV – Dakhovsky massif (sample No. 12221-7). Reflexes of phases are indicated: 1 – lizardite; 2 – chrysotile; 3 – antigorite; 4 – magnetite; 5 – brucite

Важную информацию об исходном составе и параметрах преобразований апогипербазитов несут акцессорные хромшпинели [1, 10, 11] – наиболее устойчивые минеральные фазы первичного магматического парагенезиса. Нередко в ходе последующих трансформаций они приобретают в разной степени выраженное зональное строение. Изменение состава ядер хромшпинелей рассматриваемых серпентинитовых массивов отвечает офиолитовому тренду (рис. 2.1); часть их составов – магматическим хромшпинелям (рис. 2.2).



Условные обозначения: 1 – поля составов на классификационной диаграмме Al – Cr – Fe³⁺ в соответствии с номенклатурой, разработанной Н.В. Павловым: 1 – хромиты; 2 – субферрихромиты; 3 – алюмохромиты; 4 – субферриалюмохромиты; 5 – ферриалюмохромиты; 6 – субалюмоферрихромиты; 7 – феррихромиты; 8 – хромпикотиты; 9 – субферрихромпикотиты; 10 – субалюмохроммагнетиты; 11 – хроммагнетиты; 12 – пикотиты; 13 – магнетиты; стрелкой обозначен первичный тренд дифференциации в верхней мантии (по [12]); 2 – поля составов метаморфических хромшпинелидов (по [6]), абиссальных перидотитов (по [10]), надсубдукционных зон (по [1, 3]) и задуговых бассейнов (по [2]) на классификационной диаграмме Cr# – Mg#; 3 – классификационная диаграмма Cr#–TiO₂ (по [4]); 4 – классификационная диаграмма Cr – Fe²⁺# (по [13]); 5 – составы аксессуарных хромшпинелидов из массивов Южного Урала на диаграмме Al – Cr – Fe³⁺ (по [14]); центральные пояса: 5.1 – Калканский и Ишкининский массивы; 5.2 – Куликовский массив; восточные пояса: 5.3 – Варшавский, Верблюжьегорский, Татищевский, Успеновский, Наследницкий, Могутовский, Каряжный, Дружининский, Гогинский массивы. Составы хромшпинелидов: а) Даховский массив; б) Кишинский массив; с) Беденский массив; д) Нижнетебердинский массив (ядра – залитые, оторочки – незалитые)

Рис. 2. Положение составов хромшпинелидов на диаграммах
 / Fig. 2. The position of the compositions of chrome-spinelides in the diagrams

Наиболее обогащенные алюминием и магнием ядра, отвечающие хромпикотитам (Cr# 0,36–0,43, Mg# 0,66–0,72), выявлены в составе нижнетебердинских серпентинитов; они наблюдаются в зернах полигональной формы, имеющих микропористые каймы феррихромит – хроммагнетитового состава. В серпентинитах этого массива присутствуют и зерна алюмохромитового состава (Cr# 0,69–0,73, Mg# 0,47–0,51), отличающиеся изометрично-округлыми очертаниями, однородностью состава и присутствием магнетитовых оторочек; нередко наблюдается приуроченность таких зерен к участкам сколово-пластических деформаций. В серпентинитах Кишинского массива хромшпинели представлены зёрнами, чаще полигональной формы, с отчетливым зональным строением: их ядра имеют алюмохромитовый (Cr# 0,50–0,70, Mg# 0,39–0,64) с редкими реликтовыми участками хромпикотитового состава, каймы – феррихромит – хроммагнетитовый состав; редко наблюдаются тонкие оторочки магнетита. Для серпентинитов Беденского массива

(относительно слабо охарактеризованных электронно-зондовыми исследованиями) типичны зерна, имеющие алюмохромитовые ядра (Cr# 0,68–0,74, Mg# 0,37–0,61) и феррихромит-хроммагнетитовые оторочки, а также однородные хромитовые зерна. Более однообразен состав хромшпинелей Даховского массива – они соответствуют субферрихромитам – хромитам (Cr# 0,80–0,81, Mg# 0,35–0,40), обычно обрамлены тонкими оторочками магнетита.

Вышеприведенные особенности указывают на присутствие признаков двух этапов изменения состава пород: первый проявлен в изменении состава ядер хромшпинелей и отражает тренд мантийной эволюции протолита; второй выражен в составе серпентиновых ассоциаций, каёмки и оторочек хромшпинелей.

Состав наиболее богатых алюминием реликтовых магматических хромшпинелей отвечает хромпикотитам. Впоследствии на фоне высокотемпературного пластического течения они трансформированы в алюмохромиты и затем частично – в субферрихромиты – хромиты. Такой тренд преобразования наблюдается во многих ультрабазитовых массивах (при этом наблюдается связь хромитов с дунитами), однако общепринятой модели этого процесса не разработано (краткий обзор взглядов отражен в работах [11–14]). Рост величины Cr# в дунитах и хромититах многими исследователями рассматривается как результат воздействия на мантийный субстрат расплавов бонинитового состава в надсубдукционной обстановке [15]. В целом состав хромшпинелей отвечает типичному для дунитов-гарцбургитов, что соответствует установленному на основе петрографических исследований [7]. Судя по особенностям состава ядер хромшпинелей, протолит связан с геодинамической обстановкой супра- или надсубдукционных зон (SSZ) и деплтированной мантией (рис. 2.3). При этом составы, тяготеющие к наиболее «океанической» обстановке и менее деплтированному субстрату, устанавливаются для нижнетебердинских серпентинитов. Вариации составов ядер беденских и даховских шпинелей указывают на их значительную высокотемпературную метасоматическую переработку (рис. 2.4).

При эксгумации зондированные зерна мантийного состава сохранились лишь частично, поскольку после перекристаллизации они интенсивно перерабатываются гидротермальными растворами с образованием микропористых и атолловых структур. В рассматриваемых массивах наиболее значительное гидротермальное преобразование отмечается в породах с признаками низкотемпературной серпентинизации (Нижнетебердинский, Даховский массивы). В условиях окислительной среды и интенсивной циркуляции обогащенных кремнезёмом растворов оторочки хромпикотитовых ядер зонированных хромшпинелей замещены феррихромитом – хроммагнетитом, а зерна алюмохромитов и субферрихромитов – хромитов обрамлены магнетитовыми каймами. Наиболее стабильны зерна в существенно антигоритовых серпентинитах Кишинского массива, где их особенности отражают преобразование в условиях пониженного отношения флюид – порода с участием восстановленных флюидов [9].

Геологическая позиция серпентинитов

Существенно антигоритовые серпентиниты Кишинского массива локализованы между фрагментами пластин двух раннегерцинских тектонических покровов – Ацгаринского и Кизилкольского. Эти фрагменты приурочены к Бамбакскому блоку Пшекиш-Тырныузской межблоковой шовной зоны и перемещены из основной области развития доверхнепалеозойских комплексов тектонической зоны Передового хребта. Кизилкольский покров сложен среднепалеозойским вулканогенным комплексом пород островодужной природы и терригенно-карбонатным, принадлежащим к шельфу остаточной дуги [16]. Ацгаринский метаморфический комплекс условно относится к верхнему протерозою и рассматривается как соответствующий одному из террейнов герцинской структуры. Хризотил-антигоритовые и антигоритовые серпентиниты типичны также для ассоциации с Ацгаринским покровом в верховьях р. Ацгары, Маркопиджского массива в среднем течении р. Маркопидж, приуроченного к флангу Блыбского поднятия кристалликума, и ряда других, обнаженных в центральной и южной частях тектонической зоны Передового хребта. Расположенные севернее в структуре Передового хребта серпентиниты Беденского массива тектонически ассоциируют с Тоханским покровом, комплексы которого связываются с фронтальным бассейном [17] или задуговым бассейном [16] палеоостровной дуги; массив образован разного масштаба и петрографического состава линзовидными телами. Нижнетебердинский массив приурочен к северному флангу зоны Передового хребта (к разлому на границе с

Карачаево-Черкесским горст-антиклинорием). Серпентиниты Даховского массива образуют небольшие линзовидные тела, причлененные к герцинскому террейну в судетскую фазу (прорваны позднегерцинскими гранитами [8]).

Заключение

Обобщение данных об особенностях апогипербазитов беденского комплекса указывает на их принадлежность к дунит-гарцбургит-лерцолитовой серии, связанной с «реститовым комплексом» офиолитов, особенности которого связывают с частичным плавлением верхней мантии, сопровождающимся удалением легкоплавкой (базальтовой) составляющей и пластической деформацией тугоплавкого остатка [18]. Обнаженные на уровне эрозионного среза породы беденского комплекса отвечают гарцбургитовой части разреза ультрабазитов офиолитового комплекса (что характерно для многих комплексов, в частности Южного Урала [13, 14, 19]).

Судя по составу аксессуарных хромшпинелей (рис. 2.5) и характеру серпентинизации, рассмотренные массивы близки к апогарцбургитовым массивам Центрального пояса Южного Урала, являющегося восточной ветвью Главного Уральского разлома (связанных с сильно истощенными реститами, сходными с ультрабазитами основания островных дуг [14]), и Восточно-Уральской мегазоны Южного Урала (сходными с ультрабазитами задуговых бассейнов [14]). На юге зоны Передового хребта в ассоциации с тектоническими пластинами островодужного комплекса выражены черты протолита перидотитов, присущие истощенным реститам островодужной обстановки (рис. 2.3) (при этом для кишинских хромшпинелей отмечается сходство с серпентинитовыми диапирами фронтальных частей Марианской и Идзу-Бонинской островных дуг [9]). Несколько обособленные черты констатируются для даховских серпентинитов. Связанные с ними хромшпинели обнаруживают сходство с группой, описанной в серпентинитах Куликовского массива Центрального пояса Южного Урала (рис. 2.5); последние связываются с апогипербазитами, возникшими в ходе кристаллизации пироксенитовых расплавов повышенной щелочности и титанистости [19].

Интенсивность проявления коровых метаморфических процессов в целом для рассматриваемых массивов близка. При этом можно говорить о тенденции развития более высокотемпературных серпентинитовых (хризотил-антигоритовых и антигоритовых) ассоциаций к югу зоны Передового хребта.

Список источников

1. *Ishii T., Robinson P.T., Maekawa H., Fiske R.* Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana fore-arc, Leg125 // *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results: Ocean Drilling Program*. P. Fryer, J.A. Pearce, L.B. Stokking, eds. TX, USA: College Station, 1992. Vol. 125. P. 445–485.
2. *Stern R.J., Johanson P.R., Kröner A., Yibas B.* Neoproterozoic ophiolites of the Arabian-Nubian Shield // *Precambrian ophiolites and related rocks. Developments in Precambrian Geology*. Amsterdam: Elsevier, 2004. Vol. 13. P. 95–128.
3. *Murata K., Maekawa H., Yokose H., Yamamoto K., Fujioka K., Ishii T., Chiba H., Wada Y.* Significance of serpentinitization of wedge mantle peridotites beneath Mariana forearc, western Pacific // *Geosphere*. Geological Society of America. 2009. Vol. 5 (2). P. 90–104.
4. *Lasheen E.S.R., Saleh G.M., Khaleal F.M., Alwetaishi M.* Petrogenesis of Neoproterozoic Ultramafic Rocks, Wadi Ibib-Wadi Shani, South Eastern Desert, Egypt: Constraints from Whole Rock and Mineral Chemistry // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11. P. 10524.
5. *Варлаков А.С.* Типы метаморфических преобразований альпинотипных гипербазитов Урала // *Уральский минерал*. сб. 1998. № 8. С. 127–133.
6. *Grieco G., Merlini A.* Chromite alteration processes within Vourinos ophiolite // *Int. J. of Earth Sciences*. 2012. Vol. 101 (6). P. 1523–1533.
7. *Снежко Е.А.* Петрохимические типы ультрабазитов Северного Кавказа и их структурная позиция. М.: ВИНТИ, 1985. Деп. рук. № 7884-85. 162 с.
8. *Popov Yu.V., Zhabin A.V., Pustovit O.E.* Mineral composition of serpentinites of the tectonic melange of the Dakhovsky crystalline protrusion (Greater Caucasus) // *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2019. Vol. 9 (4). P. 38–48.

9. Popov Yu.V., Pustovit O.E., Nikulin A.Yu. Mineral composition of serpentinites of the Kishinskij protrusion (Greater Caucasus) // *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2021. Vol. 11 (1). P. 38–51.
10. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol. 86 (1). P. 54–76.
11. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks // *J. of Petrology*. 2001. Vol. 42. P. 2279–2302.
12. Перевозчиков Б.В., Плотников А.В., Макиев Т.Т. Природа вариаций состава рудной и акцессорной хромшпинели ультрабазитового массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении*. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2004. № 6. С. 170–180.
13. Чащухин И.С. О генетических типах дунитов в ультрамафитах складчатых областей (на примере Урала) // *Изв. Уральского гос. горного ун-та*. 2019. Вып. 2 (54). С. 42–48.
14. Савельев Д.Е. Состав акцессорных хромшпинелидов из ультрабазитов Южного Урала как отражение геодинамической обстановки формирования массивов // *Вестн. Пермского ун-та. Геология*. 2013. № 1 (18). С. 17–25.
15. Arai S., Miura M. Podiform chromitites do form beneath mid-ocean ridges // *Lithos*. 2015. Vol. 232. P. 143–149.
16. Омельченко В.Л. О месте пород Блыбского комплекса в домезозойской структуре зоны Передового хребта (Северный Кавказ) // *Геотектоника*. 2007. № 4. С. 60–70.
17. Греков И.И. Среднепалеозойская Большескавказская островная дуга и вулканогенно-осадочное оруденение // *Металлогения древних и современных океанов*. 2006. № 1. С. 30–34.
18. Магматические горные породы. Т. 5: Ультраосновные горные породы / под ред. Е.В. Шаркова. М.: Наука, 1988. 508 с.
19. Кузнецов Г.П., Лукьянова Л.И., Шаденков Е.М., Гурская Л.И., Кораблев Г.Г., Смелова Л.А. О формационной принадлежности и перспективах платиноносности мафит-ультрамафитовых массивов Южного Урала // *Уральский минерал*. сб. 2000. № 10. С. 112–126.

References

1. Ishii T., Robinson P.T., Maekawa H., Fiske R. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana fore-arc, Leg125. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results: Ocean Drilling Program*. P. Fryer, J.A. Pearce, L.B. Stokking, eds. TX, USA: College Station, 1992;125:445-485.
2. Stern R.J., Johanson P.R., Kröner A., Yibas B. Neoproterozoic ophiolites of the Arabian-Nubian Shield. *Precambrian ophiolites and related rocks. Developments in Precambrian Geology*. Amsterdam: Elsevier Publ.; 2004;13:95-128.
3. Murata K., Maekawa H., Yokose H., Yamamoto K., Fujioka K., Ishii T., Chiba H., Wada Y. Significance of serpentinitization of wedge mantle peridotites beneath Mariana forearc, western Pacific. *Geosphere. Geological Society of America*. 2009;5(2):90-104.
4. Lasheen E.S.R., Saleh G.M., Khaleal F.M., Alwetaishi M. Petrogenesis of Neoproterozoic Ultramafic Rocks, Wadi Ibib-Wadi Shani, South Eastern Desert, Egypt: Constraints from Whole Rock and Mineral Chemistry. *Appl. Sci*. 2021;11:10524.
5. Varlakov A.S. Types of metamorphic transformations of alpine-type hypermafic rocks of the Urals. *Ural'skii mineral. sb. = Ural Mineralogical Collection*. 1998;(4):127-133. (In Russ.)
6. Grieco G., Merlini A. Chromite alteration processes within Vourinos ophiolite. *International Journal of Earth Sciences*. 2012;101(6):1523-1533.
7. Snezhko E. A. *Petrochemical types of ultrabasites of the North Caucasus and their structural position*. Moscow: VINITI; 1985. 162 p. (In Russ.)
8. Popov Yu.V., Zhabin A.V., Pustovit O.E. Mineral composition of serpentinites of the tectonic melange of the Dakhovsky crystalline protrusion (Greater Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*. 2019;9(4):38-48.
9. Popov Yu.V., Pustovit O.E., Nikulin A.Yu. Mineral composition of serpentinites of the Kishinskij protrusion (Greater Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*. 2021;11(1):38-51.
10. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984;86(1):54-76.
11. Barnes S. J., Roeder P. L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42:2279-2302.
12. Perevozchikov B. V., Plotnikov A. V., Makiev T. T. Nature of Composition Variations in Ore and Accessory Cr-Spinel of the Syum-Keu Ultramafic Massif (Polar Urals). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo = Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny. Scientific Readings in Memory of P.N. Chirvinsky*. 2004;6:170-180. (In Russ.)

13. Chashchukhin I. S. On the genetic types of dunites in ultramafic folded regions (on the example of the Urals). *Izv. Ural'skogo gos. gornogo un-ta = News of the Ural State Mining University*. 2019;(2):42-48. (In Russ.)
14. Savel'ev D. E. The composition of accessory chromespinelids from ultrabasites of the Southern Urals as a reflection of the geodynamic situation of the formation of arrays. *Vestn. Permskogo un-ta. Geologiya = Bulletin of Perm University. Geology*. 2013;(1):17-25. (In Russ.)
15. Arai S., Miura M. Podiform chromitites do form beneath mid-ocean ridges. *Lithos*. 2015;232:143-149.
16. Omel'chenko V.L. Position of the Blyb complex in the pre-mesozoic crustal structure of the front range zone in the Northern Caucasus. *Geotektonika = Geotectonics*. 2007;41(4):306-314. (In Russ.)
17. Grekov I.I. Middle Paleozoic Bolshekavkazskaya island arc and volcanogenic-sedimentary mineralization. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov = Metallogeny of Ancient and Modern Oceans*. 2006;(1):30-34. (In Russ.)
18. Sharkov E.V., ed. *Magmatic rocks. Vol. 5. Ultrabasic rocks*. Moscow: Nauka Publ.; 1988. 508 p. (In Russ.)
19. Kuznetsov G.P., Lukyanova L.I., Shadenkov E.M., Gurskaya L.I., Korablev G.G., Smelova L.A. Formation affiliation and prospects of platinum-bearing mafic-ultramafic massifs of the Southern Urals. *Ural'skii mineral. sb. = Ural Mineralogical Collection*. 2000;(10):112-126. (In Russ.)

Информация об авторах

Ю.В. Попов – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра месторождений полезных ископаемых, руководитель Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды.

О.Е. Пустовит – главный геолог.

С.В. Левченко – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы.

Information about the authors

Yu. V. Popov – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Mineral Deposits, Head of the Center for Research on Mineral Raw Materials and the State of the Environment.

O. E. Pustovit – Main Geologist.

S. V. Levchenko – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Protection.

Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена после рецензирования 12.04.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 04.04.2022; approved after reviewing 12.04.2022; accepted for publication 16.05.2022.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 574.586

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-93-102

ФИТОПЕРИФИТОННЫЕ СООБЩЕСТВА ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

**Франгиз Шамильевна Амаева^{1✉}, Айшат Абдулмажидовна Абдурахманова²,
Магомед Магомедович Османов³, Гульнара Ахмедовна Ахмедова⁴**

^{1,2,3}Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

⁴Дагестанский государственный университет, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹a_frana@mail.ru[✉]

²aishat52@mail.ru

³inkvachilav@mail.ru

⁴a_gula@rambler.ru

Аннотация. Поскольку фитоперифитон наряду с фитопланктоном является первым трофическим звеном и наиболее информативным биологическим объектом, то анализ его видовой структуры дает возможность составить представление об экологическом состоянии водоема. Гидробиологический мониторинг морских акваторий, как и гидрохимический, позволяет оценить качество вод, причем не только в данный момент, но и в предшествующий период, а также при хроническом загрязнении. Таким образом, проведенные исследования видовой разнообразия и распределения фитоперифитона позволяют не только в целом расширить представления об альгофлоре прибрежных акваторий Среднего Каспия, но также дополнить и актуализировать данные реализуемых программ экологического мониторинга.

Ключевые слова: Каспийское море, литораль, фитоперифитон, альгофлора, биологическое разнообразие, доминанты

Для цитирования: Амаева Ф.Ш., Абдурахманова А.А., Османов М.М., Ахмедова Г.А. Фитоперифитонные сообщества прибрежной акватории Каспийского моря // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 93–102.

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

Original article

PHYTOPERIPHERYTIC COMMUNITIES OF THE CASPIAN LITTORAL ZONE

**Frangiz Sh. Amaeva^{1✉}, Aishat A. Abdurakhmanova²,
Magomed M. Osmanov³, Gulnara A. Akhmedova⁴**

^{1, 2, 3}Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

⁴Dagestan State University, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

¹a_frana@mail.ru[✉]

²aishat52@mail.ru

³inkvachilav@mail.ru

⁴a_gula@rambler.ru

© Амаева Ф.Ш., Абдурахманова А.А., Османов М.М., Ахмедова Г.А., 2022

Abstract. Since phytoplankton, along with phytoplankton, is the first trophic link and the most informative biological object, the analysis of its species structure makes it possible to get an idea of the ecological state of the reservoir. Hydrobiological monitoring of the sea area, as well as hydrochemical monitoring, makes it possible to assess the quality of water, not only at the moment, but also in the previous period, as well as in case of chronic pollution. Thus, the conducted studies of the species diversity and distribution of phytoplankton make it possible not only to broaden the overall understanding of the algoflora of the coastal waters of the Middle Caspian, but also to supplement and update the data of the implemented environmental monitoring programs.

Keywords: Caspian Sea, littoral zone, phytoplankton, algoflora, biological diversity, dominants

For citation: Amaeva F.Sh., Abdurakhmanova A.A., Osmanov M.M., Akhmedova G.A. Phytoplanktonic Communities of the Caspian Littoral Zone. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):93-102. (In Russ.).

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

Известно, что микроводоросли участвуют в процессе биологического самоочищения и являются чувствительным биоиндикатором изменений водных экосистем [1, 2]. На формирование фитоперифитона как экотонного сообщества оказывают влияние донные и планктонные альгоценозы, так как для перифитонных организмов наиболее важным ресурсом является свободное пространство, в котором постоянно происходит обмен между субстратом и толщей воды [2]. В то же время в составе фитоперифитона в большом количестве могут быть представлены микроводоросли-обрастатели, которые не всегда присутствуют в пробах фитопланктона. Если также принять во внимание конкурентные отношения между фитопланктоном и фитоперифитоном, обусловленные противоположными друг другу фазами развития этих двух сообществ (чем выше уровень хлорофилла фитопланктона и его биомасса, тем ниже таковые фитоперифитона, и наоборот) [3], то анализ видового состава микроводорослей перифитона позволит составить более полное представление об альгофлоре исследуемого района, что определяет актуальность наших исследований. Несмотря на достаточно хорошую изученность фитоперифитона различных внутренних водоемов и водотоков [1–7], сведения флористического характера о фитоперифитоне Каспийского моря до сих пор немногочисленны.

Цель работы – изучение пространственно-временной динамики видового разнообразия, структуры и распределения фитоперифитона в различных биотопах дагестанской прибрежной акватории Каспийского моря.

Материал и методы

В данной работе использован гидробиологический материал, собранный в период 2010–2016 гг. Исследования проводили на участках дагестанского побережья Каспийского моря (с севера к югу – Главный Сулак, Махачкала (городской пляж и морской порт), Манаскент, Избербаш и Дербент) (рис. 1), характеризующихся различным температурным и солевым режимами. Для получения более полной информации об альгофлоре исследуемого района мы применяли одновременно различные методы сбора и обработки проб [8–11]. Учитывая сезонные колебания различных групп микроводорослей, отбор проб проводили ежемесячно в течение вегетационного периода (с марта по октябрь) на прибрежных каменных грядках, различных искусственных субстратах, погруженных в морскую воду, а также с экспериментальных керамических пластин (100/100 мм) (Махачкалинский морской торговый порт). При помощи скребков с определенной площади поверхности исследуемых субстратов собирали доступную часть биопленки. Пробы разбавляли в 100 мл дистиллированной воды, фиксировали раствором Люголя и концентрировали осадочным методом согласно стандартной методике [9]. Камеральную обработку проб проводили под световым микроскопом Olympus CX-21, таксономическую принадлежность водорослей устанавливали согласно руководствам и определителям. При классификации диатомовых водорослей использовали определители отечественных диатомологов [12, 13] и динофлагеллят-схему Доджа [14], синезелёных и зелёных – систему А.А. Еленкина и Смитас с изменениями, принятыми А.И. Прошкиной-Лавренко и И.В. Макаровой [13].



Рис. 1. Карта-схема районов исследования / Fig. 1. Schematic map of the study areas

Всего за период исследований было собрано и обработано 1176 проб фитоперифитона. Для сравнения степени флористического сходства исследуемых сообществ использовали индекс Жаккара, для характеристики ведущих комплексов микроводорослей и установления доминантов – индекс доминирования [15].

Группирование биотопов проводилось при помощи алгоритма евклидовой дистанции методом Варда (Ward's method, пакет программ Statistica) с использованием данных о видовом составе, относительной численности и биомассе видов.

Для экологической характеристики исследованных биотопов проведен анализ среднегодовых значений содержания растворенного кислорода, мг/л, аммонийного азота, мкг/л, азота общего, мкг/л, и фосфора общего, мкг/л, в поверхностном и придонном слоях морской воды во все сезоны года за период с 2010 по 2016 г. Данные гидрохимических исследований, выполненных на дагестанском взморье Среднего Каспия, предоставлены Дагестанским гидрометцентром.

Результаты и обсуждение

Всего за период исследований в пробах фитоперифитона было обнаружено 115 видов и внутривидовых таксонов микроводорослей, относящихся к 73 родам. Фитоперифитон был представлен 6 отделами: *Cyanophyta* (27 видов, относящихся к 15 родам); *Bacillariophyta* (57 видов, относящихся к 32 родам); *Dinophyta* (10 видов, относящихся к 8 родам); *Chlorophyta* (14 видов, относящихся к 11 родам); *Euglenophyta* (5 видов, относящихся к 5 родам) и *Xanthophyta* (2 вида, относящихся к 2 родам).

Основу видового разнообразия всех исследуемых участков (более 75 % от общего числа видов) составляли диатомовые (*Bacillariophyta*) и синезелёные (*Cyanophyta*) микроводоросли. Пресноводные зелёные (*Chlorophyta*) микроводоросли в основном были обнаружены на экспериментальных пластинах в Махачкалинском морском торговом порту и расположенном севернее остальных участков побережье Главного Сулака (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Таксономическая структура фитоперифитона в дагестанском прибрежном районе Каспийского моря / Taxonomic structure of phytoplankton in the Dagestan coastal region of the Caspian Sea

Таксоны	Главный Сулак	Махачкала		Манаскент	Избербаш	Дербент
		Пляж	Морской порт			
<i>Cyanophyta</i>						
Виды	12	13	18	8	9	10
Роды	10	8	13	6	5	6
<i>Bacillariophyta</i>						
Виды	28	10	49	25	16	20
Роды	22	8	29	21	12	14
<i>Dinophyta</i>						
Виды	6	1	5	6	6	6
Роды	6	1	3	4	4	4
<i>Chlorophyta</i>						
Виды	6	1	11	2	2	–
Роды	5	1	8	2	2	–
<i>Euglenophyta</i>						
Виды	1	–	2	3	2	2
Роды	1	–	2	3	2	2
<i>Xanthophyta</i>						
Виды	–	1	–	2	1	1
Роды	–	1	–	2	1	1
Всего						
Виды	53	26	85	46	36	39
Роды	44	19	55	38	26	27

Эвгленовые (*Euglenophyta*) и желто-зелёные водоросли (*Xanthophyta*) были представлены наименьшим числом видов и не во всех исследуемых районах; *Xanthophyta* – только двумя видами, не обнаруженными нами в предыдущих исследованиях: *Ophiocytium cochleare* Lemm – в южных прибрежных участках (Манаскент, Избербаш и Дербент) и в осенних пробах прибрежной акватории Махачкалинского городского пляжа, а *Botrydiopsis eriensis* Ehr. – только в прибрежной акватории Манаскента.

Общие для всех исследуемых биотопов виды: синезелёные (*Cyanophyta*) – *Johannesbaptistia pellucida* (Diskie) W.R. Taylor & et. Drout, *Oscillatoria* sp. Vauch и *Gloeocapsa minor* Kützing Hollerb; диатомовые (*Bacillariophyta*) – *Actinocyclus ehrenbergii* var. *ehrenbergii* Ralfs, *Pseudosolenia calcaravis* M. Schultze и *Chaetoceros paulsenii* Ostf.; динофитовые (*Dinophyta*) – *Prorocentrum cordatum* (Ostf.) Dodge и *Prorocentrum obtusum* Ostf. (Grev.) Cl.

Наибольшее число видов обнаружено в акватории Махачкалинского морского торгового порта (табл. 1), из которых 18 найдены в пробах фитоперифитона с экспериментальных пластин: *Gomphosphaeria lacustris* Chodat f. *lacustris*, *Tolypothrix penicillata* (Ag. Kossinsk), *Spirulina laxissima* G.S.West, *Campulodiscus clupeus* (Ehrenberg) Ehr. ex. Kützing, *Cerataulina pelagica* (Cl.)

Hendey, *Nitzschia reversa* var *reversa* W. Sm., *N.glosterium* (Ehr.) W. Sm, *N. longissima* (Ehr.) W. Sm., *Navicula placentula* (Ehr) Grunov, *Amphiprora poludosa* Smith., *Pleurosigma* sp., *Rhopalodia gibba* (Ehrenberg) Otto Muller, *Actinastrum hantzschii* Lagerch., *Glosterium moniliferum* (Schmid) Bourr Ehr., *Pediastrum tetras* (Ehr.) Ralfs, *P. simplex* (Meyen), *Binuclearia lauterbornii* Smidte Pr.-Lavr., *Lepocinglis* sp., *Goniaulax polyedra* Stein, *Ophiocytium cocleare*. Вероятно, такое пополнение списка альгофлоры в данном биотопе объясняется преимуществами этой методики сбора материала.

Большое таксономическое разнообразие фитоперифитона отмечено также в расположенной севернее акватории побережья Главного Сулака, где обнаружены микроводоросли всех перечисленных отделов, кроме *Xanthophyta*, в том числе 10 видов, не встреченных нами ранее. Здесь основу видовой структуры составляли привнесенные с речной водой пресноводные и солоновато-пресноводные микроводоросли: *Gloeocapsa minor*, *Diatoma anceps* (Her) Kircher, *Pinnularia viridis* (*Nitzschia*) Ehrenb., *Navicula lanceolata* (C.A.Agardh) Ehrenb., *Cerataulina pelagica*, *Podosira parvula* Makar. et. Pr.-Lavr., *Cosmarium granulatum* Cord., *Oocystis submarina* Lagerh., *Ankistrodesmus falcatus* (Corda) Ralfs., *Goniaulax polyedra*. Кроме того, из всех исследованных природных субстратов в биотопе Главного Сулака обнаружено наибольшее число видов пресноводных зелёных водорослей.

В целом в дагестанской части прибрежной акватории Каспийского моря встречались виды всех экологических групп, но наиболее массовыми были морские (*Coscinodiscus radiatus* Ehr., *Actinocyclus ehrenbergii* var. *ehrenbergii*, *Thalassionema nitzchioides* Grun, *Prorocentrum obtusum*, *Chaetoceros paulsenii*) и солоновато-водные (*Diatoma. anceps*, *D. elongatum*, *Synedra ulna* Nitzsch. (Ehr), *Nitzschia acicularis* (Kutz) W.Sm. var *acicularis*, *Melosira moniliformis* (O.F.Mull) C.Agardh., *Dolichospermum spiroides* (Klebahn) Wackin, Hoffmann et. Komarek. и *Achnantheidium minutissimum* (Kutzing.) Czarneckui).

Как видно из табл. 2, исследуемые биотопы в сравнении видового состава находились в области малого соответствия флор (ниже 66 %).

Наиболее сходными между собой по видовому составу были биотопы Главный Сулак и Махачкалинский морской порт, а также южные участки побережья: Манаскент – Дербент и Избербаш – Дербент (рис. 2). Это объясняется относительным сходством таких определяющих факторов среды, как температурный и солевой режимы в прилегающих акваториях.

Таблица 2 / Table 2

Индекс флористического сходства (по Жаккару) микроводорослей перифитона прибрежной зоны Каспийского моря / Index of floristic similarity (according to Jaccard) of microalgae in the periphyton of the Caspian coastal zone

Биотоп	Индекс флористического сходства, %					
	Главный Сулак	Махачкала, пляж	Махачкала, морской порт	Манаскент	Избербаш	Дербент
Главный Сулак	–	13	41	22	27	35
Махачкала, пляж	13	–	23	9	19	14
Махачкала, морской порт	41	23	–	32	29	29
Манаскент	22	9	32	–	34	42
Избербаш	27	19	29	34	–	56
Дербент	35	14	29	42	56	–

Более всего различались между собой фитоперифитонные биоценозы участков Махачкала (пляж) – Манаскент, а также Главный Сулак – Махачкала (пляж). Прибрежный участок Главного Сулака расположен на расстоянии 14 км севернее Махачкалы, где в акваторию моря с речным стоком привносятся пресноводные виды фитопланктона. Манаскент, напротив, находится южнее Махачкалы (40 км), и здесь наблюдается резкое изменение условий морской среды, что также отражается на видовом составе микроводорослей перифитона акватории в сторону увеличения тепловодных морских видов при сохранении эврибионтных (эвригаллиных и эвритермных). Микроводоросли пресноводного и холодноводного комплексов здесь встречаются реже.

В проведенных ранее исследованиях таксономического состава микроводорослей дагестанского побережья Каспия нами обнаружены 85 видов в фитопланктоне и 70 – в фитоперифитоне [16, 17]. Фитопланктон представлен четырьмя отделами (*Bacillariophyta*, *Cyanophyta*, *Pyrrophyta*, *Chlorophyta*), а фитоперифитон дополнен еще двумя (*Euglenophyta* и *Xantophyta*). Таким образом, исследования фитоперифитонных сообществ позволили дополнить список микроводорослей 30 видами, не найденными нами ранее в альгофлоре дагестанского прибрежного района Каспийского моря.

Сравнительный анализ видовой структуры фитоперифитона исследованных нами участков дагестанского побережья Каспийского моря показал их различия. На динамику биоразнообразия фитоперифитонных ценозов оказывают влияние многие факторы среды (стадия формирования сообщества, качество и ориентация субстрата, климат и др.) [6, 7, 10, 18–21]. Так, в районе городского пляжа Махачкалы при высоком количественном развитии фитоперифитона для них отмечено самое низкое видовое разнообразие, что, возможно, связано с поступлением сточных вод из расположенного рядом канализационного коллектора. Для динофитовых зелёных и желто-зелёных было отмечено всего по одному виду. По числу видов преобладали синезелёные, менее прихотливые и способные развиваться в загрязненной химическими веществами воде. В меньшей степени – диатомовые водоросли. К наиболее массовым относились синезелёные *Merismopedia punctata* Meyen, *Gloeocapsa minor*, *Dolichospermum spiroides* и *Oscillatoria sp.* В весенний период доминантный комплекс дополнялся также диатомовыми водорослями – *Thalassionema nitzchioides* и *Diatoma elongatum*.

В районах Манаскента и Избербаша отмечены все 6 отделов микроводорослей, а в самом южном из исследованных участков, Дербенте, отсутствовали только генетически пресноводные зелёные микроводоросли. В фитоперифитоне каменных гряд в районе Манаскента доминантами были диатомеи *Cocconeis placentula* Ehrenberg. и желто-зелёная водоросль *Ophiocytium cochleare*, субдоминантами – *Prorocentrum cordatum* и *Euglena acusformis* J. Schuller. В прибрежных водах Избербаша и Дербента в пробах фитоперифитона массово встречались диатомеи *Coscinodiscus radiatus*, *Surirella linearis* W. Smith., *Thalassionema nitzchioides* и динофитовые *Prorocentrum scutellum* Schröd и *P. obtusum*.

В акватории Махачкалинского морского торгового порта было отмечено высокое видовое разнообразие диатомовых микроводорослей, наиболее массовыми из которых были *Thalassionema nitzchioides*, *Dolichospermum spiroides*, *Melosira moniliformis*, *Coscinodiscus radiatus*, *Chaetoceros paulsenii*.

В экотопе Главный Сулак, менее подверженном антропогенному прессу, были представлены диатомовые, зелёные и синезелёные водоросли, среди которых доминантами были *Thalassionema nitzchioides*, *Nitzschia acicularis*, *Achnanthes minutissima*, *Ankistrodesmus falcatus* (Corda) Ralfs, *Gloeocapsa minor* и *Oscillatoria sp.*

Не менее важный фактор, влияющий на видовое разнообразие альгофлоры, – распределение биогенных элементов, при избыточном поступлении которых происходит изменение видовой структуры альгоценоза и его доминантного комплекса. Одним из основных источников поступления в воды Каспийского моря биогенных элементов, необходимых для роста и продукции микроводорослей (азота и фосфора), является речной сток Волги, Сулака и Терека. Из рис. 3 видно, что концентрации биогенных элементов колебались по сезонам. По данным гидрхимических исследований, среднегодовые значения растворенного кислорода, азота общего

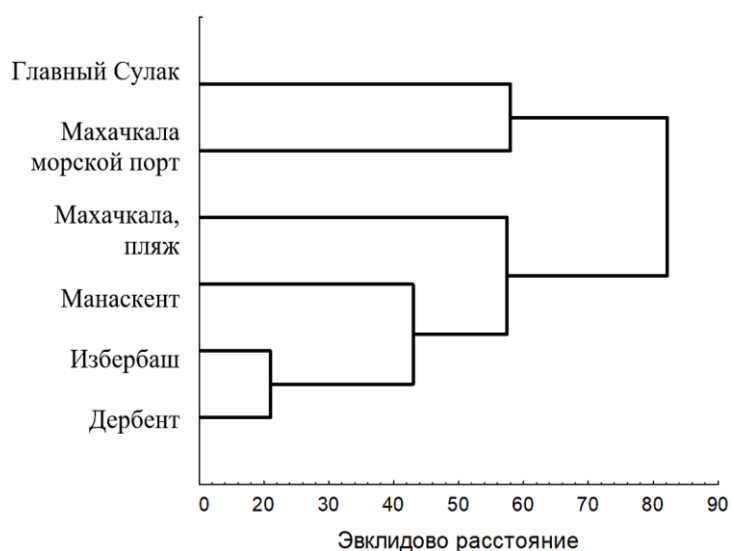


Рис. 2. Дендрограмма сходства видового состава фитоперифитона биотопов литоральной зоны Каспийского моря / Fig. 2. Dendrogram of the similarity of the phytoperiphyton species composition in biotopes of the Caspian littoral zone

и фосфора общего изменялись в исследованных биотопах дагестанского побережья по мере трансформации речного стока с севера к югу с незначительной тенденцией к снижению концентраций (рис. 4). Таким образом, неравномерное распределение биогенных элементов в исследованных биотопах прибрежной акватории Каспийского моря в сезонной и пространственной динамике также отразилось на видовой структуре и доминантном комплексе фитоперифитона, чутко реагирующем на любые изменения факторов среды.

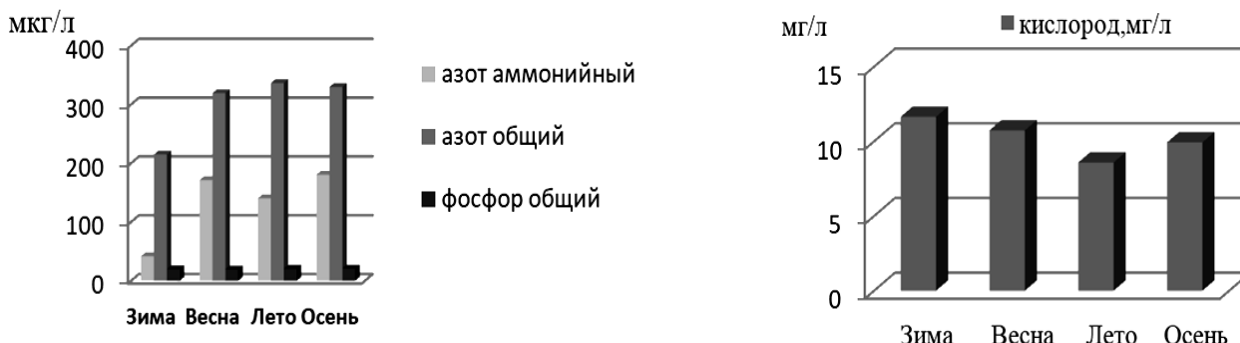


Рис. 3. Сезонное распределение биогенных элементов по дагестанскому прибрежному району Каспийского моря / Fig. 3. Seasonal distribution of nutrients in the Dagestan coastal region of the Caspian sea

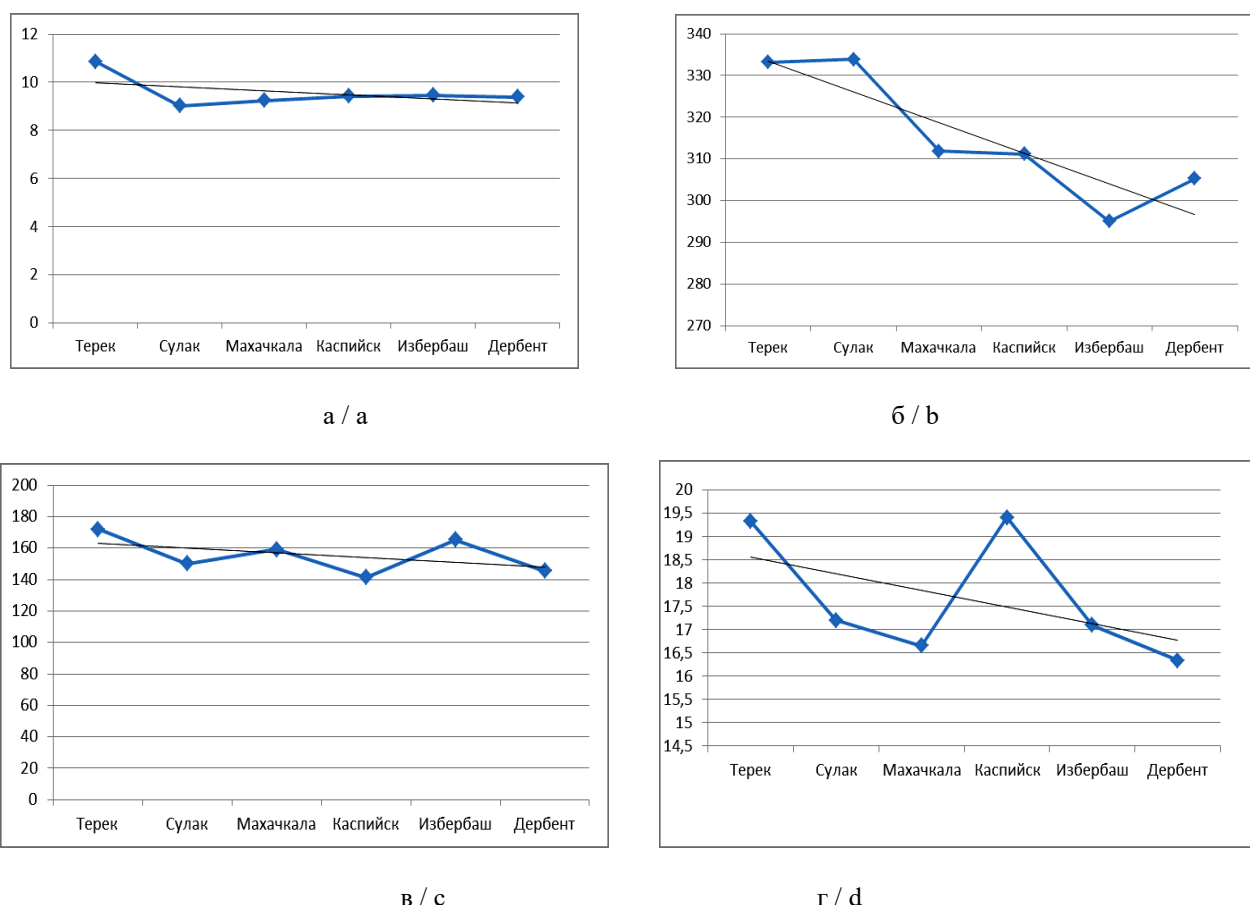


Рис. 4. Распределение биогенных элементов по биотопам дагестанского района побережья Каспия: а – кислород, мг/л; б – фосфор, мкг/л; в – азот общий, мкг/л; г – азот аммонийный, мкг/л / Fig. 4. Distribution of biogenic elements in biotopes of the Dagestan coastal aqua of the Caspian sea: a - oxygen, mg/l; b - phosphorus, µg /l; c - total nitrogen, µg/l; d - ammonium nitrogen, µg/l

Заключение

Проведенные исследования позволили выявить особенности таксономической структуры фитоперифитона изученных прибрежных участков Каспийского моря, а также пополнить список альгофлоры прибрежной акватории Среднего Каспия 30 видами микроводорослей.

Всего за период исследований в пробах фитоперифитона было обнаружено 115 видов и внутривидовых таксонов микроводорослей, относящихся к 73 родам. Основу всех исследуемых сообществ микроводорослей перифитона составляли виды отдела *Vacillariophyta*.

Показано, что исследуемые модельные акватории являлись экосистемами с различными ценоотическими группировками, которые в сравнении видового состава находились в области малого соответствия флор (ниже 66 %) и различались по доминантному комплексу. Отмечены как биотопические, так и сезонные различия видовой структуры фитоперифитона, которые определялись неравномерным распределением факторов среды.

Список источников

1. Глуценко Л.А. Структура фитоперифитона в оценке качества воды разнотипных водных объектов бассейна реки Енисей : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2010. 23 с.
2. Комулайнен С.Ф. Формирование структуры фитоперифитона рек Карелии : автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2001. 23 с.
3. Метелева Н.И. Структура и продуктивность фитоперифитона водоёмов бассейна Верхней Волги : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2013. 22 с.
4. Басова С.А. Состав, распределение и продуктивность перифитона и микрофитобентоса // Биологическая продуктивность озера Красного. М.: Наука, 1976. 104 с.
5. Костикова Л.Е. Особенности состава и развития перифитона, высших водных растений Днепропетровских водохранилищ // Гидробиол. журн. 1980. Т. 16, № 5. С. 127–129.
6. Сысова Е.А. Структура фитоперифитонных сообществ на начальной стадии обрастания и ее связь с биотопом // Вестн. Тюменского гос. ун-та. 2005. № 5. С. 116–124.
7. Moschini-Carlos V., Pompeo M.L. M., Henry R., Rocha O. Temporal variation in the structure of periphytic algal communities on an artificial substrate in the Jurumirim Reservoir, S.P., Brasil // Verh. Intern. Verein. Limnol. 1998. Vol. 26. P. 1758–1763.
8. Водоросли: справочник / Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П., Паламарь-Мордвинцева Г.М., Ветрова З.И., Кордюм Е.Л., Мошкова Н.А., Приходькова Л.П., Коваленко О.В., Ступина В.В., Царенко П.М., Юнгер В.П., Радченко М.И., Виноградова О.Н., Бухтиярова Л.Н., Разумна Л.Ф. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
9. Инструкция по сбору и обработке планктона. М.: ВНИРО, 1977. 72 с.
10. Комулайнен С.Ф. Методические рекомендации по изучению фитоперифитона в малых реках. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2003. 43 с.
11. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / под ред. А.В. Цыбань. Л., 1980. 188 с.
12. Прошкина-Лавренко А.И., Макарова И.В. Водоросли планктона Каспийского моря. Л.: Наука, 1968. 291 с.
13. Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. Определитель пресноводных водорослей СССР. Диатомовые водоросли. М.: Совет. наука, 1951. Вып. 4. 619 с.
14. Dodge J.D. Atlas of Dinoflagellates. London: Farrand Press, 1985. 119 p.
15. Kownacki A. Taxocens of Chironomidae in streams of the Polish High Tatre MTS // Acta Hydrobiol. 1971. Vol. 13, № 2. P. 439–464.
16. Абдурахманова А.А., Амаева Ф.Ш., Османов М.М., Алигаджиев М.М. Таксономическая характеристика фитопланктона дагестанского побережья Среднего Каспия // Вестн. ДНЦ. 2010. № 36. С. 30–36.
17. Абдурахманова А.А., Амаева Ф.Ш., Османов М.М., Алигаджиев М.М. Видовая структура фитоперифитона каменных гряд побережья Среднего Каспия // Изв. ДГПУ. Естеств. и точные науки. 2012. № 1. С. 22–25.
18. Карпович В.А., Шевелева О.А., Бальцевич П.Г. Видовой состав фитоперифитона весенне-летнего периода, формирующийся на искусственных субстратах в условиях антропогенной нагрузки (на примере

участка р. Свислочь, г. Минск) // Актуальные проблемы изучения и сохранения фито- и микробиоты : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГУ, 2020. С. 37–41.

19. Рябушко Л.И., Бальчева Д.С., Поповичев В.Н., Фирсов Ю.К., Рябушко В.И. Продукционные характеристики фитоперифитона экспериментальных стеклянных пластин и фитопланктона в Карантинной бухте (Крымское побережье Чёрного моря) // Альгология. 2014. Т. 24, № 4. С. 504–517.

20. Dunck B., Rodrigues L., Bicudo D.C. Functional diversity and functional traits of periphytic algae during a short-term successional process in a Neotropical floodplain lake // Brazilian J. of Biology. 2015. Vol. 75, № 3. P. 587–597.

21. Lane C.M., Taffs K.H., Corfield J.L. A comparison of diatom community structure on natural and artificial substrata // Hydrobiologia. 2003. Vol. 493. P. 65–79.

References

1. Glushchenko L.A. *Phytoperiphyton structure in the assessment of water quality of different types of water bodies in the Yenisei River basin*. Dissertation Thesis. Krasnoyarsk, 2010. 23 p. (In Russ.).
2. Komulainen S.F. *Formation of the phytoperiphyton structure in the rivers of Karelia*. Dissertation Thesis. Saint Petersburg, 2001. 23 p. (In Russ.).
3. Meteleva N.I. *The structure and productivity of phytoperiphyton in reservoirs of the Upper Volga basin*. Dissertation Thesis. Borok, 2013. 22 p. (In Russ.).
4. Basova S.A. Composition, distribution and productivity of periphyton and microphytobenthos. *Biological productivity of Lake Krasnoe*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 104 p. (In Russ.).
5. Kostikova L.E. Features of the composition and development of periphyton, higher aquatic plants of Dnepropetrovsk reservoirs. *Gidrobiol. zhurn. = Hydrobiological Journal*. 1980;16(5):127-129. (In Russ.).
6. Sysova E.A. The structure of phytoperiphyton communities at the initial stage of fouling and its relationship with the biotope. *Vestn. Tyumenskogo gos. un-ta = Tyumen State University Herald*. 2005;(5):116-124. (In Russ.).
7. Moschini-Carlos V., Pompeo M.L.M., Henry R., Rocha O. Temporal variation in the structure of periphytic algal communities on an artificial substrate in the Jurumirim Reservoir, S.P., Brasil. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1998;26:1758-1763.
8. Wasser S.P., Kondratyev N.V., Masyuk N.P., Palamar-Mordvintseva G.M., Vetrova Z.I., Kordyum E.L., Moshkova N.A., Prikhodkova L.P., Kovalenko O. V., Stupina V.V., Tsarenko P.M., Yunger V.P., Radchenko M.I., Vinogradova O. N., Bukhtiyarova L.N., Rasumna L.F., eds. *Algae*. Reference. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1989. 608 p. (In Russ.).
9. *Instructions for the collection and processing of plankton*. Moscow: VNIRO Publ.; 1977. 72 p. (In Russ.).
10. Komulainen S.F. *Methodical recommendations for the study of phytoperiphyton in small rivers*. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center, Russian Academy of Sciences Press; 2003. 43 p. (In Russ.).
11. Tsiban A.V., ed. *Guide to the methods of biological analysis of sea water and bottom sediments*. Leningrad, 1980. 188 p. (In Russ.).
12. Proshkina-Lavrenko A.I., Makarova I.V. *Plankton algae of the Caspian Sea*. Leningrad: Nauka Publ.; 1968. 291 p. (In Russ.).
13. Zabelina M.M., Kiselev I.A., Proshkina-Lavrenko A.I., Sheshukova V.S. *Keys to freshwater algae of the USSR. Diatoms*. Moscow: Sovetskaya nauka Publ.; 1951;(4). 619 p. (In Russ.).
14. Dodge J.D. *Atlas of Dinoflagellates*. London: Farrand Press; 1985. 119 p.
15. Kownacki A. Taxocens of Chironomidae in streams of the Polish High Tatre MTS. *Acta Hydrobiol.* 1971;13(2):439-464.
16. Abdurakhmanova A.A., Amaeva F.Sh., Osmanov M.M., Aligadzhiev M.M. Taxonomic characteristics of the phytoplankton of the Dagestan coastal area of the Middle Caspian. *Vestn. DNTs = Herald of the Daghestan Scientific Center*. 2010;(36):30-36. (In Russ.).
17. Abdurakhmanova A.A., Amaeva F.Sh., Osmanov M.M., Aligadzhiev M.M. Species structure of phytoperiphyton of stone ridges of the Middle Caspian coast. *Izv. DGPU. Estestv. i tochnye nauki = Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences*. 2012;(1):22-25. (In Russ.).
18. Karpovich V.A., Sheveleva O.A., Baltsevich P.G. Species composition of phytoperiphyton in the spring-summer period, formed on artificial substrates under anthropogenic load (on the example of a section of the Svisloch River, Minsk). *Actual problems of studying and preserving phyto- and mycobiota. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*. Minsk: BSU Press, 2020:37-41. (In Russ.).
19. Ryabushko L.I., Balycheva D.S., Popovichev V.N., Firsov Yu.K., Ryabushko V.I. Production characteristics of phytoperiphyton of experimental glass plates and phytoplankton in Karantinnaya Bay (Crimean coast of the Black Sea). *Algologiya = Algology*. 2014;24(4):504-517. (In Russ.).

20. Dunck B., Rodrigues L., Bicudo D.C. Functional diversity and functional traits of periphytic algae during a short-term successional process in a Neotropical floodplain lake. *Brazilian Journal of Biology*. 2015;75(3):587-597.

21. Lane C. M., Taffs K. H., Corfield J. L. A comparison of diatom community structure on natural and artificial substrata. *Hydrobiologia*. 2003;493:65-79.

Информация об авторах

Ф.Ш. Амаева – кандидат биологических наук, ученый секретарь, Прикаспийский институт биологических ресурсов.

А.А. Абдурахманова – научный сотрудник, лаборатория морской биологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов.

М.М. Османов – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория морской биологии, Прикаспийский институт биологических ресурсов.

Г.А. Ахмедова – кандидат географических наук, доцент кафедры рекреационной географии и устойчивого развития, Институт экологии и устойчивого развития.

Information about the authors

F.Sh. Amaeva - Candidate of Science (Biology), Scientific Secretary, Caspian Institute of Biological Resources.

A.A. Abdurakhmanova – Researcher, Marine Biology Laboratory, Caspian Institute of Biological Resources.

M.M. Osmanov - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Marine Biology Laboratory, Caspian Institute of Biological Resources.

G.A. Akhmedova - Candidate of Science (Geography), Associate Professor of Department of Recreational Geography and Sustainable Development, Institute of Ecology and Sustainable Development.

Статья поступила в редакцию 23.03.2022; одобрена после рецензирования 29.03.2022; принята к публикации 16.05.2022.

The article was submitted 23.03.2022; approved after reviewing 29.03.2022; accepted for publication 16.05.2022.

Научная статья

УДК 633.11/58.087

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-103-109

НОВЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРНЕВОЙ МАССЫ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Екатерина Николаевна Нежинская^{1✉}, Ольга Степановна Безуглова²

^{1, 2} Федеральний Ростовский аграрный научный центр, пос. Рассвет, Ростовская обл., Россия

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

¹ penkova2008@mail.ru✉

² osbesuglova@sfnu.ru

Аннотация. Формирование подземной массы озимой пшеницы, с одной стороны, в значительной степени определяет выживаемость растений и в конечном счете урожайность культуры. А с другой стороны, этот процесс во многом зависит от свойств почвы, прежде всего физических, а также от общего уровня плодородия. Мониторинг процесса изменения корневой массы растений в ходе их развития дает возможность своевременной корректировки этого параметра с помощью агротехнических приемов. Однако контроль этого параметра довольно сложен, поэтому исследования, направленные на оптимизацию метода учета корневой массы растений, весьма актуальны.

Нами предложен способ определения подземной массы озимой пшеницы. Техническая сущность изобретения включает фотографирование объекта, перенесение изображения в компьютер, кадрирование исследуемой части. Далее через обработку полученного изображения с помощью гистограммы проводится анализ выходных оттенков и отличительных признаков. Задача метода основана на получении новых корреляционных связей между массой и спектральным показателем изображения. В роли главного компонента анализа выступает процентиль, полученный при оценке гистограммы, а именно только черной области изображения и её оттенков.

Расчет массы корневой системы пшеницы осуществляется по формуле $M_{кс} = D \times K$, где $M_{кс}$ – масса корневой системы, $т \cdot га^{-1}$; D – процентиль гистограммы; K – постоянный коэффициент (отношение между массой корневой системы и значением процентилля гистограммы).

В результате научных исследований была получена тесная корреляционная взаимосвязь ($r=0,98$) между массой корневой системы и процентилем гистограммы. Данный способ определения подземной массы не только позволяет упростить получение сведений о массе корневой системы озимой пшеницы, но и дает возможность повторного проведения измерений в цифровом формате.

Ключевые слова: озимая пшеница, способ определения корневой массы, компьютерная обработка

Для цитирования: Нежинская Е.Н., Безуглова О.С. Новый способ определения корневой массы озимой пшеницы // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 103–109.

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

Original article

A NEW METHOD FOR DETERMINING THE ROOT MASS OF WINTER WHEAT

Ekaterina N. Nezhinskaya^{1✉}, Olga S. Bezuglova²

^{1, 2} Federal Rostov Agricultural Research Centre, Rassvet, Rostov Region, Russia

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

¹ penkova2008@mail.ru✉

² osbesuglova@sfnu.ru

© Нежинская Е.Н., Безуглова О.С., 2022

Abstract. *The formation of the underground mass of winter wheat, on the one hand, largely determines the survival of plants and, ultimately, the yield of the crop. And on the other hand, this process largely depends on the properties of the soil, and, above all, physical, as well as on the overall level of fertility. Monitoring the process of changing the root mass of plants during their development makes it possible to timely adjust this parameter using agrotechnical techniques. However, the control of this parameter is quite complicated, so the relevance of research aimed at optimizing the method of accounting for root mass is very relevant.*

We have proposed a method for determining the underground mass of winter wheat. The technical essence of the invention includes photographing the object, transferring the image to a computer, and then cropping the part under study. Further, through the processing of the resulting image using a histogram, an analysis of the output shades and distinctive features is carried out. The task of the method is based on obtaining new correlations between the mass and the spectral index of the image. The main component of the analysis is the percentile obtained by evaluating the histogram, namely, only the black area of the image and its shades.

The calculation of the mass of the root system of wheat is carried out according to the formula: $M_{ks} = D \times K$, M_{ks} is the mass of the root system $t \cdot ha^{-1}$; D is the percentile of the histogram, %; and K is a constant coefficient (the ratio between the mass of the root system and the value of the percentile of the histogram).

As a result of scientific research, a close correlation relationship ($r = 0.98$) was obtained between the mass of the root system (M_{ks}) and the percentile of the histogram (D). This method of the invention makes it possible not only to simplify the determination of the mass of the root system of winter wheat, but also makes it possible to repeat measurements in digital format.

Keywords: *winter wheat, method of root mass determination, computer processing*

For citation: *Nezhinskaya E.N., Bezuglova O.S. A New Method for Determining the Root Mass of Winter Wheat. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2022;(2):103-109. (In Russ.).*

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

Введение

Корневая система – исключительно важный орган любого растения. На протяжении всей жизни растительного организма она функционирует с надземной ее частью, и то, насколько активно и продуктивно происходит процесс взаимодействия, влияет на жизнедеятельность всего растения. Чем скорее развивается и нарастает листовая и корневая поверхность, чем большую площадь она охватывает, тем эффективнее происходит процесс питания растений [1, 2]. Растения быстрее усваивают питательные вещества и вступают в сложнейшие взаимоотношения как с абиотическими элементами почвы, так и с почвенными микроорганизмами. От прохождения первого этапа органогенеза в дальнейшем зависит продуктивность растений, количество урожая и его качество [3, 4].

Немаловажен и тот факт, что корневая система создает особый микроклимат в прикорневом слое почвы, способствует сохранению влажности и постоянной температуры, препятствует воздействию эрозионных процессов. Корневые выделения являются питательной средой для почвенных микроорганизмов, благодаря чему во многом и происходит процесс восстановления гумуса, органической составляющей плодородных почв [5–7].

Корни имеют довольно сложное биологическое строение. Характерной особенностью архитектоники корней злаковых культур является развитие разветвленной, плотной, мочковатой системы. Её общая протяженность в 10 раз больше, чем у культур пропашного вида, благодаря чему влага сильнее десугируется из корнеобитаемых слоев почвы [8, 9]. Корневая система озимой пшеницы морфологически отличается от других растений. На концах придаточных корневых отростков имеется зона, которая состоит из тонких волосков длиной 1–10 мм и толщиной 0,1 мм. Поэтому при планировании способа определения массы корневой системы пшеницы очень важно, чтобы методика позволяла точно учитывать все участки исследуемой системы корней [10].

Существует много методов по изучению подземных частей растений. Объясняется это тем, что большинство ученых применяли и применяют свои методы, зачастую являющиеся преобразованными способами или более модифицированными вариантами одного из ранее разработанных.

Анализ информационных источников [11] показывает, что до настоящего времени основным способом экспериментального определения морфологических параметров корневых систем растений озимой пшеницы остаётся способ их раскопки, закрепления, отмывания и дальнейшего измерения толщины, длины и массы. Среди основных методик определения массы корневой системы можно выделить три способа: весовой, инструментальный и корреляционный. В основе весовых способов экспериментального измерения заложены горизонтальный, траншейный и полный вид раскопки. Параметры длины и толщины определяются путем прямого измерения, масса – взвешиванием. При вскрытии подземных частей растений используются различного вида устройства и технологии раскопок, которые не перестают совершенствоваться. Инструментальные методы включают в себя применение электрометрического измерения с использованием радарной техники. Это методы, позволяющие не разрушать корнеобитаемый слой почвы и не требующие предварительного вскрытия корней. К неразрушающим методам относится и третий способ определения морфологических параметров корневых систем – корреляционный. Его методика направлена на получение массы подземной части растений через ранее выявленные зависимости между показателями подземных органов и количественными показателями надземных частей.

Оценивая способы исследования подземных частей растений в полевых условиях, можно сделать вывод, что все они достаточно трудоемки и сложны. Ввиду этого следует выбирать наиболее характерные и типичные растения. Исследуя объекты в меньшем количестве, но качественно отобранные и детально изученные, можно получить более качественный результат, нежели при работе со случайными единицами отбора в большем количестве. Для точности получаемых результатов морфологических исследований подземной части растений должна быть необходимая повторность. Недостатком общеизвестных способов по изучению массы корневых систем в полевых условиях является то, что данные, которые мы получаем, относятся к разовым показателям. При повторном их измерении через промежуток времени получатся иные результаты, так как в фитомассе подземной части исследуемого объекта за это время произойдут неизбежные биологические изменения. С наступлением положительных температур озимая пшеница активно развивается. Каждая последующая фаза наступает через 7–10 дней. Поэтому при отборе образцов в другую фазу развития получаем и иные результаты. Для получения сопоставимых результатов необходимо сократить срок отбора до минимума.

Нами были проведены исследования, связанные с поиском альтернативных способов сбора данных о биологическом объекте. Поиск информации привел нас к многочисленным способам применения фото- и аэроснимков. Параметры биомассы исследуемых объектов получают по их изображению. Объединяющим недостатком всех этих способов является то, что получить информацию можно только о биомассе надземной части растения. В связи с этим перед нами была поставлена задача разработать новый способ определения массы корневой системы, найти объективные параметры корреляционных связей между массой корневой системы и показателями гистограммы изображения.

Методика и объекты исследования

Исследования были проведены в ФГБНУ «Федеральный Ростовский аграрный научный центр» в многофакторном стационарном опыте, на склоне юго-восточной экспозиции крутизной до 3,5–4,0°, где эрозионные процессы выражены слабо. Опыт зарегистрирован в Российской географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169). Объекты исследования – образцы корневой системы озимой пшеницы, которые отбираются при помощи специального устройства, разработанного учеными этого центра [12]. Исследуемые образцы корней вскрываются в период их максимального развития, в фазу цветения-колошения. Для большей достоверности отбор образцов проводился в посевах озимой пшеницы при условии выращивания различных севооборотных предшественников на участках с разными вариантами основной обработки почвы. Образцы отбирали в трехкратной повторности. Для определения связи между массой корневой системы озимой пшеницы и процентилем были использованы корреляционный анализ и коэффициент линейной корреляции Пирсона [13].

Данный способ определения массы корневой системы озимой пшеницы осуществляется в 2 этапа.

1-й этап. Отбор образцов происходит при помощи метода монолита. Монолит отбирают размером 15×30×60 см. Далее образец необходимо отмыть. После отмытки корни извлекают, высушивают и переносят на бумажный белый лист. Для измерения корневой системы используют измерительную линейку и делают снимок. Фотографировать нужно при хорошем дневном освещении, с высоты 1 м, под углом фотосъемки между направлением и объектом исследования 90°.

2-й этап. Получение цифровых параметров по изображению. Имеющийся фотоснимок переносится в компьютер, формат файла может иметь любое разрешение. При помощи графического редактора Adobe Photoshop изображение переводят в ахроматический режим, применяя опцию «коррекция» (рис. 1).

Подготовленное изображение подвергается кадрированию на участки размером 10×30 см. Указанное действие позволяет в дальнейшем определять массу корневой системы озимой пшеницы в интересующем исследователя слое почвы. Каждый кадрированный рисунок проходит спектральный анализ через построение гистограммы распределения цветовых оттенков в направлении слева направо, от черного до белого. Место, где содержание черного цвета резко уменьшается, выделяют указателем мышки, тем самым устанавливая границу между областями. На рис. 2 представлены области спектра в виде гистограммы.

Максимальное количество пикселей изображения согласно определенному уровню яркости гистограммы показано на наивысшем уровне столбца. Минимальное представлено более короткими столбцами. В тех областях гистограммы, где количество пикселей меньше всего, отсутствует отображение столбика. Гистограмма не выдает конкретного количества пикселей, лишь только показывает распределение пикселей изображения по уровням яркости. Показатель, отображающий число пикселей в точке расположения указателя или под ним, называется процентиль. Он выражает процент от общего числа пикселей анализируемого изображения.



Рис 1. Корневая система озимой пшеницы по предшественнику чистый пар в варианте с чизельной обработкой почвы в ахроматическом режиме / Fig. 1. Root system of winter wheat according to the pure fallow predecessor in the variant with chisel tillage in achromatic mode

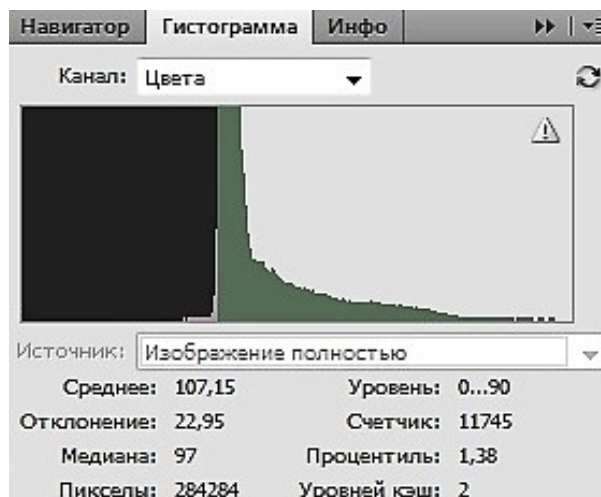


Рис 2. Спектральная гистограмма фитомассы корней озимой пшеницы по предшественнику чистый пар в варианте с минимальной обработкой почвы в слое 30–40 см / Fig. 2. Spectral histogram of the phytomass of winter wheat roots according to the predecessor pure fallow in the variant with minimal tillage in the layer 30–40 cm

Следовательно, мы используем гистограмму для количественного определения черного цвета, который выражается через процентиль. Масса корневой системы озимой пшеницы определяется по формуле [14] $M_{кс} = D \times K$, где $M_{кс}$ – масса корневой системы, $t \cdot га^{-1}$; D – процентиль гистограммы; K – постоянный коэффициент, $t \cdot га^{-1}$ (отношение между массой корневой системы и значением percentиля гистограммы).

Величина постоянного коэффициента была установлена нами экспериментальным путем следующим образом. После этапа фотосъемки образец фитомассы корневой системы делили на слои 0–10, 10–20 – и так до глубины 60 см. Взвешивание проводили на аналитических лабораторных весах. Полученные массы корневой системы пшеницы выражали в граммах ($M_{г}$).

Площадь поверхности слоя отобранного монолита $S_{уч} = 15 \times 30 \text{ см} = 0,045 \text{ м}^2$. Для соответствия полученных результатов массу корней с площади $0,045 \text{ м}^2$ пересчитали на площадь $S = 1 \text{ га}$ по формуле $M_t = \frac{S \cdot M_{г}}{S_{уч} \cdot 10^6}$, где M_t – масса корней с площади 1 га, t ; S – площадь 1 га $= 10^4 \text{ м}^2$.

В результате сопоставления величин массы корневой системы (таблица), вычисленных вышеизложенным способом, с данными, полученными путем взвешивания в лабораторных условиях, был рассчитан постоянный коэффициент $K = 0,85 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

Масса корней озимой пшеницы, постоянный коэффициент и процентиль по горизонтам почвы / Weight of winter wheat roots, constant coefficient and percentile index for soil horizons

Слой горизонта, см	Масса корней озимой пшеницы, $t \cdot га^{-1}$	Процентиль	$K, t \cdot га^{-1}$
0–10	7,42	8,71	0,85
10–20	6,90	8,12	0,85
20–30	4,67	5,43	0,86
30–40	3,74	4,41	0,85
40–50	3,01	3,50	0,86
50–60	1,96	2,31	0,85
Среднее	4,62	5,41	0,85

Заключение

Установлена тесная корреляционная взаимосвязь ($r = 0,98$) между массой корневой системы и процентилем гистограммы, на основании чего был рассчитан постоянный коэффициент $K = 0,85$.

Изучение размещения корневой системы в пахотном слое почвы является одной из задач оценки эрозионной устойчивости озимой пшеницы. Обработка почвы, выполненная различными орудиями и на разную глубину, по-разному влияет на плотность и запас продуктивной влаги в почве. От этого зависит и размещение корневой системы в пахотном горизонте. Предложенный метод способен оценить не только массу, но и расположение корневой системы в почве.

Разработан новый способ определения массы корневой системы пшеницы [14], дающий возможность объективно проводить исследования биологического объекта не только в полевых условиях, но и в лабораторных, независимо от прогноза погоды, в любое удобное время и при необходимости выполнять повторные измерения изображения в цифровом формате.

Для проведения морфологических исследований корневой системы разработанный нами способ не требует сложного технического обеспечения, приборы и устройства, применяемые для получения первичного материала и дальнейшего ряда работ по исследованию и анализу объекта, являются доступными.

Список источников

1. Хоменко А.Д., Зражевский М.Н., Богданова А.М., Левченко Л.А., Одеянченко Л.В., Полякова Л.Л., Рябокляч В.А., Чернова Л.М., Москалюк М.В. Корневое минеральное питание и продуктивность растений. Киев: Наукова думка, 1976. 208 с.
2. Будько А.С., Войтова В.Н., Гордей С.И. Особенности формирования корневой системы образцов озимой пшеницы // Земледелие и селекция в Беларуси. 2021. № 57. С. 281–288.

3. Ионова Е.В., Самофалова Н.Е. Развитие корневой системы озимой твердой пшеницы в ювенильный период // *Зерновое хозяйство России*. 2010. № 1. С. 19–22.
4. Медведев И.Ф. Динамика развития корневой системы яровой пшеницы в условиях активного проявления засух и различной обеспеченности элементами питания растения // *Достижение науки и техники АПК*. 2013. № 8. С. 6–10.
5. Бородин Н.Н., Шапошникова И.М., Листопадов И.Н., Садименко П.А., Вальков В.Ф., Грызлов Е.В., Шевченко В.М., Бабушкин В.М., Ильинский Н.Н. Плодородие почвы и урожай. Ростов н/Д.: Ростиздат, 1981. 128 с.
6. Листопадов И.Н. Севообороты южных регионов. Ростов н/Д., 2005. 276 с.
7. Хомяков Ю.В. Роль корневых выделений растений в формировании биохимических свойств корнеобитаемой среды : автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2009. 22 с.
8. Красильников П.К. Методика полевого изучения подземных частей растений (с учетом специфики ресурсоведческих исследований). Л.: Наука, 1983. 208 с.
9. Зинченко С.И., Рябов Д.А. Особенности формирования корневой системы зерновых культур в агроэкосистемах серой лесной почвы // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 8-3. С. 651–656.
10. Сытник К.М., Книга Н.М., Мусатенко Л.И. Физиология корня. Киев: Наукова думка, 1972. 356 с.
11. Рожков В.А., Кузнецова И.В., Рахмателлоев Х.Р. Методы изучения корневых систем растений в поле и лаборатории : учеб.-метод. пособ. 2-е изд. М.: МГУЛ, 2008. 30 с.
12. Мищенко А.Е., Гаевая Э.А., Кисс Н.Н. Устройство для отбора и фиксирования почвенных проб и корневой системы растения. Патент на полезную модель RU 119108 U1, 10.08.2012. Заявка № 2012110082/05 от 15.03.2012.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования): учебник. 6-е изд. М.: Альянс, 2011. 352 с.
14. Зинченко В.Е., Гаевая Э.А., Нежинская Е.Н., Ильинская И.Н., Тарадин С.А., Мищенко А.В. Способ определения массы корневой системы пшениц. Патент на изобретение RU 2716576 C1, 12.03.2020. Заявка № 2018144830 от 17.12.2018.

References

1. Khomenko A.D., Zrazhevsky M.N., Bogdanova A.M., Levchenko L.A., Odeyanenko L.V., Polyakova L.L., Ryaboklyach V.A., Chernova L.M., Moskalyuk M.V. *Root mineral nutrition and plant productivity*. Kyiv: Naukova dumka Publ.; 1976. 208 p. (In Russ.).
2. Budko A.S., Voitova V.N., Gordey S.I. Features of the formation of the root system of winter wheat samples. *Zemledelie i selektsiya v Belarusi = Arable Farming and Plant Breeding in Belarus*. 2021;(57):281-288. (In Russ.).
3. Ionova E.V., Samofalova N.E. Development of the root system of winter durum wheat in the juvenile period. *Zernovoe khozyaistvo Rossii = Grain Economy of Russia*. 2010;(1):19-22. (In Russ.).
4. Medvedev I.F. Dynamics of development of the root system of spring wheat in conditions of active manifestation of droughts and various availability of plant nutrients. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2013;(8):6-10. (In Russ.).
5. Borodin N.N., Shaposhnikova I.M., Listopadov I.N., Sadimenko P.A., Valkov V.F., Gryzlov E.V., Shevchenko V.M., Babushkin V.M., Ilyinsky N.N. *Soil fertility and harvest*. Rostov-on-Don: Rostizdat Publ.; 1981. 128 p. (In Russ.).
6. Listopadov I.N. *Crop rotations of the southern regions*. Rostov-on-Don, 2005. 276 p. (In Russ.).
7. Khomyakov Yu.V. *The role of root secretions of plants in the formation of biochemical properties of the root environment*. Dissertation Thesis. Saint Petersburg, 2009. 22 p. (In Russ.).
8. Krasilnikov P.K. *Methodology of field study of underground parts of plants (taking into account the specifics of resource studies)*. Leningrad: Nauka Publ.; 1983. 208 p. (In Russ.).
9. Zinchenko S.I., Ryabov D.A. Features of the formation of the root system of grain crops in agroecosystems of gray forest soil. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2014;(8-3):651-656. (In Russ.).
10. Sytnik K.M., Книга N.M., Musatenko L.I. *Physiology of the root*. Kyiv: Naukova dumka Publ.; 1972. 356 p. (In Russ.).
11. Rozhkov V.A., Kuznetsova I.V., Rakhmatelloev H.R. *Methods of studying plant root systems in the field and laboratory*. Textbook. 2nd ed. Moscow: MGUL Press; 2008. 30 p. (In Russ.).
12. Mishchenko A.E., Gayevaya E.A., Kiss N.N. *Device for the selection and fixation of soil samples and the root system of the plant*. Utility model patent RU 119108 U1, 10.08.2012. (In Russ.).

13. Dospekhov B.A. *Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)*. Textbook. 6th ed. Moscow: Al'yans Publ.; 2011. 352 p. (In Russ.).

14. Zinchenko V.E., Gayevaya E.A., Nezhinskaya E.N., Ilyinskaya I.N., Taradin S.A., Mishchenko A.V. *Method for determining the mass of the root system of wheat*. Patent for the invention RU 2716576 C1, 12.03.2020. Application No. 2018144830 dated 17.12.2018. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.Н. Нежинская – научный сотрудник.

О.С. Безуглова – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный Ростовский аграрный научный центр; профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов, Южный федеральный университет.

Information about the authors

E.N. Nezhinskaya – Researcher.

O.S. Bezuglova – Doctor of Science (Biology), Main Researcher, Professor, Federal Rostov Agricultural Research Centre; Professor of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Southern Federal University.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 16.05.2022.

The article was submitted 22.03.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 16.05.2022.

Научная статья

УДК 597.556.31(262.5)

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-110-122

**ЭЙДОНОМИЯ И ВНУТРИВИДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
МОРСКОГО ЕРША SCORPAENA PORCUS LINNAEUS, 1758
(PISCES: SCORPAENIDAE) КАВКАЗСКОГО ШЕЛЬФА
РОССИЙСКОГО СЕКТОРА ЧЕРНОГО МОРЯ**

Антон Алексеевич Полин^{1✉}, Наталья Владимировна Попова², Татьяна Викторовна Денисова³

¹ Азово-Черноморский филиал ФГБУ «Главрыбвод», Краснодар, Россия

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

² ООО «Краснодар Водоканал», Краснодар, Россия

¹ polin_a_a@mail.ru ✉

² popova-nv@mail.ru

³ denisova777@inbox.ru

Аннотация. Как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе имеются лишь фрагментарные данные о внутривидовой изменчивости морского ерша *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 – фонового вида рыб прибрежных черноморских ихтиоценозов. Целью данной работы было изучение эйдономии (внешней морфологии) морского ерша, обитающего в границах кавказского шельфа российского сектора Черного моря, как способа исследования его внутривидовой изменчивости. В работе проведено сравнение морфологических (пластических и меристических) признаков морских ершей трех районов в пределах кавказского шельфа Черного моря. Изучены выборки из прибрежных акваторий в районах Большого Утриша, Магри и Адлера. Показано, что морские ерши рассматриваемых акваторий обладают весьма различными комплексами морфологических признаков, по которым можно успешно отличать представителей разных районов друг от друга.

Ключевые слова: морской ёрш, Черное море, кавказский шельф, Большой Утриш, Магри, Адлер, пластические признаки, меристические признаки, критерий Манна – Уитни, дискриминантный анализ

Для цитирования: Полин А.А., Попова Н.В., Денисова Т.В. Эйдономия и внутривидовая изменчивость морского ерша *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 (Pisces: Scorpaenidae) кавказского шельфа российского сектора Черного моря // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 110–122.

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

Original article

**EIDONOMY AND INTRASPECIES VARIABILITY OF BLACK SCORPIONFISH
SCORPAENA PORCUS LINNAEUS, 1758 (PISCES: SCORPAENIDAE) FROM THE
CAUCASIAN SHELF OF THE RUSSION SECTOR OF THE BLACK SEA**

Anton A. Polin^{1✉}, Natalya V. Popova², Tatyana V. Denisova³

¹ Azov-Black Sea Branch, "Glavrybvod", Krasnodar, Russia

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

² "Krasnodar Vodokanal", Krasnodar, Russia

¹ polin_a_a@mail.ru ✉

² popova-nv@mail.ru

³ denisova777@inbox.ru

© Полин А.А., Попова Н.В., Денисова Т.В., 2022

Abstract. There are only fragmentary data on the intraspecific limitation of the black scorpionfish *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 in scientific literature. The black scorpionfish is a background fish species attracted to the use of Black Sea fish community. The purpose of this work was to study the eidonomy of the black scorpionfish from the Caucasian shelf of the Black Sea, as a full-fledged study of its intraspecific variability. The morphological (plastic and meristic) parameters of black scorpionfish from three water areas of the Caucasian shelf of the Black Sea are compared in this paper. Samples from coastal waters in the areas of Bolshoi Utrish, Magri and Adler were studied in this paper. It is shown that the black scorpionfish of the water areas under consideration have very different sets of morphological features, which can be used to successfully distinguish representatives of different regions from each other.

Keywords: black scorpionfish, Black Sea, Caucasian shelf, Bolshoi Utrish, Magri, Adler, plastic characters, meristic characters, Mann-Whitney U test, discriminant analysis

For citation: Polin A.A., Popova N.V., Denisova T.V. Eidonomy and Intraspecific Variability of Black Scorpionfish *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 (Pisces: Scorpaenidae) from the Caucasian Shelf of the Russian Sector of the Black Sea. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(2):110-122. (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

Морской ерш *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 – представитель семейства скорпеновых (Scorpaenidae) – обычный, а местами доминирующий вид скально-зарослевых черноморских ихтиоценозов [1–3]. Хищный образ жизни и практически полное отсутствие врагов фактически ставят данный вид на вершину трофической цепи аккумуляции энергии в экосистеме верхней сублиторали шельфовой зоны Черного моря [4].

Несмотря на широкую распространенность в Черном море (морской ерш обитает практически у всех его берегов, за исключением отдельных опресненных участков) [5, 6], изучение степени сходства (различий) биологии и морфологии этого вида в разных районах ареала практически не проводилось, внутривидовая структура мало изучена. Экологические особенности вида – обитание в прибрежной зоне (в том числе в закрытых бухтах) и отсутствие существенных миграций в течение жизни – приводят к вопросу о существовании изолированных локальных популяций (субпопуляций) морского ерша в Черном море в целом и в пределах кавказского шельфа в частности.

Как было установлено в конце 1990-х гг., ряд физиологических, биохимических, этологических и популяционных характеристик позволяет использовать морского ерша в качестве эффективного вида-биоиндикатора при анализе экологической ситуации в прибрежных водах Черного моря [7, 8].

Однако для эффективного использования вида в качестве биоиндикатора необходимо иметь четкое представление о его популяционной структуре, границах популяций, степени панмиксии и гетерогенности внутри них. Без указанной информации невозможно объективно оценить, являются ли выявляемые физиологические и морфологические различия у особей разных биотопов условно быстрым откликом, выработанным в течение жизни особи, на воздействующие факторы среды обитания или же они обусловлены долгосрочной изоляцией представителей локальных группировок (субпопуляций) и имеют накопительный наследственный характер.

В последние годы в связи с развитием и существенным расширением сферы применения молекулярно-генетических методов исследований они стали иметь особое значение в эволюционной биологии в целом и в изучении популяционной структуры рыб в частности. Однако при всей их значимости необходимо учитывать и важнейшую роль традиционных морфологических критериев. Молекулярно-генетические методы базируются на изучении части гено типа, в то время как морфотип, несмотря на его изменчивость, является концентрированным выражением всего гено типа.

Цель данного исследования – изучение морфологических характеристик и внутривидовой структуры выборок морских ершей разных районов кавказского шельфа Черного моря.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили случайные выборки морских ершей из уловов рыболовецких бригад, осуществляющих прибрежное рыболовство с помощью ставных неводов и жаберных сетей в трех акваториях кавказского шельфа Черного моря: в районах Большого Утриша, Магри и Адлера (рис. 1). Выбранные для исследования акватории значительно удалены друг от друга в географическом отношении, биотопы различаются по комплексу воздействующих биотических и абиотических факторов, включая гидрологический режим и степень антропогенной нагрузки.



Рис. 1. Карта-схема точек отбора фактического материала / Fig. 1. Map of selected actual material points

Общий объем выборки составил 265 экз., в т.ч. Большой Утриш – 101, Магри – 91, Адлер – 73 экз. Отбор материала проводили в разные сезоны года в период с декабря 2017 г. по ноябрь 2020 г.

Исследуемых морских ершей анализировали с применением стандартных ихтиологических методов [9].

От морфологически схожего представителя семейства скорпеновых – малой скорпены *Scorpaena notata* Rafinesque, 1810 – особей дифференцировали по следующим признакам: число поперечных рядов чешуй – более 60, между последним мягким лучом спинного плавника и боковой линией – 6–7; пространство над грудным плавником между его основанием, концом перепонки брюшного плавника и шипом на грудном поясе – голое [6].

Пластические признаки рыб измеряли штангенциркулем с точностью ± 1 мм по дополненной схеме, используемой А.И. Смирновым [10]. У каждой рыбы определяли 44 пластических признака: *TL* – полная длина тела; *SL* – длина тела без хвостового плавника; *OD* – длина туловища; *H* – наибольшая высота тела; *h* – наименьшая высота тела; *iH* – максимальная толщина тела; *aD* – антедорсальное расстояние; *pD* – постдорсальное расстояние; *aP* – антепекторальное расстояние; *aV* – антевентральное расстояние; *aA* – антеанальное расстояние; *PV* – пектروентральное расстояние; *VA* – вентроанальное расстояние; *PA* – пектроанальное расстояние;

pl – длина хвостового стебля; PP – расстояние между грудными плавниками; VV – расстояние между брюшными плавниками; LA – длина основания анального плавника; hA – высота анального плавника; LP – длина основания грудного плавника; hP – высота грудного плавника; IV – длина основания брюшного плавника; hV – высота брюшного плавника; IC – длина основания хвостового плавника; hC – высота хвостового плавника; ID – общая длина основания спинного плавника; $ID_{жс}$ – длина жесткой части спинного плавника; $ID_{м}$ – длина основания мягкой части спинного плавника; $hD_{жс}$ – высота основания жесткой части спинного плавника; $hD_{м}$ – высота мягкой части спинного плавника; lc – длина головы; hc – высота головы; hc_3 – высота головы по затылку; lr – длина рыла; mx – длина верхней челюсти; mn – длина нижней челюсти; o – диаметр глаза горизонтальный; o_1 – диаметр глаза вертикальный; po – посторбитальное расстояние; io – ширина лба; hs – высота кожистой лопасти над глазом; ic – наибольшая ширина головы; oo – расстояние между глазом и углом рта; or – ширина рта.

Для нивелирования влияния фактора размерности особей признаки тела (включая длину головы (lc)) нормировали на длину тела без хвостового плавника (SL), признаки головы – на длину головы и результаты выражали в процентах.

У всех рыб анализировали десять меристических признаков: $D_{жестк.}$ – количество жестких лучей в спинном плавнике; $D_{мягк.}$ – количество мягких лучей в спинном плавнике; $A_{жестк.}$ – количество жестких лучей в анальном плавнике; $A_{мягк.}$ – количество мягких лучей в анальном плавнике; $V_{жестк.}$ – количество жестких лучей в брюшном плавнике; $V_{мягк.}$ – количество мягких лучей в брюшном плавнике; C – количество лучей в хвостовом плавнике; P – количество лучей в грудном плавнике; ll – количество поперечных рядов чешуй над боковой линией; $sp.br.$ – количество тычинок на первой жаберной дуге.

Согласно рекомендациям Ю.С. Решетникова и О.А. Поповой [11], просчет лучей плавников, чешуй и жаберных тычинок производился дважды, в случае несовпадения полученных результатов – ещё раз. В ходе анализа использовали препаровальную иглу, при затруднении учета лучей у особей малых размеров – бинокулярный микроскоп МБС-9 с необходимым увеличением.

Математическая обработка данных осуществлена на основе общепринятых методов биометрии [12] с использованием программного пакета Statistica ver.10. В ходе исследования применяли параметрические и непараметрические статистические методы, дискриминантный анализ [13]. Предварительную оценку нормальности распределения проводили с использованием критериев Колмогорова – Смирнова и Шапиро – Уилка.

Результаты и обсуждение

В исследуемой выборке морских ершей из трех акваторий кавказского шельфа Черного моря встречались особи с длиной тела до конца чешуйчатого покрова (SL) от 55 до 232 мм при среднем значении $124,7 \pm 2,20$ мм. В разных районах вылова линейные показатели особей несколько отличались (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Линейные показатели морских ершей / Linear indicators of black scorpionfish

Акватория	N, экз.	SL, мм	
		$\bar{x} \pm m_x$	min – max
Большой Утриш	101	126,5±5,08	55,0–232,0
Магри	91	125,4±2,55	69,0–198,0
Адлер	73	121,4±2,17	74,0–158,0

Анализ показал, что распределение рассматриваемых признаков является нормальным. В данной связи для статистического анализа был использован метод параметрической статистики – t -критерий Стьюдента, применение которого показало, что имеющиеся различия носят случайный характер.

Для анализа морфологических характеристик морских ершей рассматриваемых акваторий у всех особей были изучены 10 меристических и 44 пластических признака (табл. 2, 3).

Таблица 2 / Table 2

Меристические признаки морских ершей / Meristic features of of black scorpionfish

Признак	$\bar{x} \pm m_x$ min-max		
	Большой Утриш (101 экз.)	Магри (91 экз.)	Адлер (73 экз.)
$D_{жестк.}$	$\frac{12,0 \pm 0,02}{11,0-12,0}$	$\frac{12,0 \pm 0,02}{11,0-12,0}$	$\frac{12,0 \pm 0,01}{11,0-12,0}$
$D_{мягк.}$	$\frac{10,0 \pm 0,04}{9,0-11,0}$	$\frac{10,1 \pm 0,05}{9,0-11,0}$	$\frac{10,1 \pm 0,04}{9,0-11,0}$
C	$\frac{16,3 \pm 0,08}{15,0-18,0}$	$\frac{16,0 \pm 0,07}{15,0-19,0}$	$\frac{16,4 \pm 0,08}{15,0-18,0}$
$A_{жестк.}$	$\frac{3,0 \pm 0,00}{3,0-3,0}$	$\frac{3,0 \pm 0,00}{3,0-3,0}$	$\frac{3,0 \pm 0,00}{3,0-3,0}$
$A_{мягк.}$	$\frac{6,0 \pm 0,03}{5,0-7,0}$	$\frac{6,0 \pm 0,03}{5,0-7,0}$	$\frac{6,0 \pm 0,02}{5,0-7,0}$
$V_{жестк.}$	$\frac{1,0 \pm 0,00}{1,0-1,0}$	$\frac{1,0 \pm 0,00}{1,0-1,0}$	$\frac{1,0 \pm 0,00}{1,0-1,0}$
$V_{мягк.}$	$\frac{5,0 \pm 0,01}{4,0-5,0}$	$\frac{5,0 \pm 0,00}{5,0-5,0}$	$\frac{5,0 \pm 0,00}{5,0-5,0}$
P	$\frac{16,3 \pm 0,06}{14,0-17,0}$	$\frac{16,2 \pm 0,07}{14,0-17,0}$	$\frac{16,2 \pm 0,07}{15,0-17,0}$
ll	$\frac{70,8 \pm 0,30}{64,0-76,0}$	$\frac{70,9 \pm 0,36}{63,0-78,0}$	$\frac{71,9 \pm 0,26}{68,0-76,0}$
$spb.br.$	$\frac{27,4 \pm 0,33}{23,0-32,0}$	$\frac{27,2 \pm 0,20}{23,0-31,0}$	$\frac{26,8 \pm 0,16}{24,0-31,0}$

Таблица 3 / Table 3

**Нормированные значения пластических признаков морских ершей
 / Values of normalized plastic features of black scorpionfish**

Признак	$\bar{x} \pm m_x$ min - max		
	Большой Утриш (101 экз.)	Магри (91 экз.)	Адлер (73 экз.)
TL	$\frac{127,2 \pm 0,67}{115,7-137,0}$	$\frac{127,5 \pm 0,33}{116,5-135,3}$	$\frac{126,9 \pm 0,06}{117,0-136,6}$
OD	$\frac{60,3 \pm 0,31}{53,8-69,4}$	$\frac{61,1 \pm 0,44}{54,5-72,7}$	$\frac{61,3 \pm 0,35}{51,0-67,6}$
H	$\frac{37,4 \pm 0,29}{31,8-45,8}$	$\frac{36,9 \pm 0,21}{32,7-41,7}$	$\frac{38,5 \pm 0,39}{31,9-48,0}$
h	$\frac{10,5 \pm 0,10}{6,8-13,9}$	$\frac{10,6 \pm 0,08}{9,2-12,6}$	$\frac{10,7 \pm 0,11}{7,9-13,0}$
iH	$\frac{21,2 \pm 0,36}{16,8-31,4}$	$\frac{20,7 \pm 0,18}{16,3-25,3}$	$\frac{22,4 \pm 0,31}{17,5-29,0}$
aD	$\frac{34,4 \pm 0,21}{28,8-41,4}$	$\frac{35,8 \pm 0,17}{31,3-39,6}$	$\frac{33,7 \pm 0,20}{29,9-37,0}$

Продолжение табл. 3

Признак	$\bar{x} \pm m_x$ min – max		
	Большой Утриш (101 экз.)	Магри (91 экз.)	Адлер (73 экз.)
<i>pD</i>	$\frac{11,5 \pm 0,22}{6,6-17,5}$	$\frac{13,2 \pm 0,14}{10,0-15,8}$	$\frac{11,6 \pm 0,20}{6,6-15,6}$
<i>aP</i>	$\frac{38,3 \pm 0,27}{31,9-46,3}$	$\frac{39,0 \pm 0,18}{34,8-42,5}$	$\frac{37,7 \pm 0,23}{32,9-42,4}$
<i>aV</i>	$\frac{39,1 \pm 0,24}{31,8-46,3}$	$\frac{40,4 \pm 0,24}{36,4-48,3}$	$\frac{39,0 \pm 0,38}{29,4-51,4}$
<i>aA</i>	$\frac{69,1 \pm 0,37}{59,4-79,5}$	$\frac{69,7 \pm 0,27}{61,5-75,2}$	$\frac{70,4 \pm 0,37}{60,3-77,5}$
<i>PV</i>	$\frac{16,5 \pm 0,45}{12,3-24,6}$	$\frac{16,7 \pm 0,16}{13,1-19,6}$	$\frac{17,8 \pm 0,26}{12,2-24,5}$
<i>VA</i>	$\frac{33,8 \pm 0,46}{13,8-44,4}$	$\frac{32,1 \pm 0,50}{12,8-45,8}$	$\frac{35,5 \pm 0,58}{25,0-47,3}$
<i>PA</i>	$\frac{36,3 \pm 0,36}{29,4-47,8}$	$\frac{35,4 \pm 0,30}{27,9-44,4}$	$\frac{37,9 \pm 0,40}{31,0-47,3}$
<i>pl</i>	$\frac{17,7 \pm 0,20}{13,3-22,8}$	$\frac{17,6 \pm 0,21}{12,1-22,4}$	$\frac{17,3 \pm 0,23}{11,3-21,9}$
<i>PP</i>	$\frac{13,0 \pm 0,36}{7,7-21,4}$	$\frac{12,4 \pm 0,17}{9,4-16,4}$	$\frac{14,4 \pm 0,32}{9,7-19,3}$
<i>VV</i>	$\frac{7,8 \pm 0,16}{4,8-18,9}$	$\frac{7,7 \pm 0,09}{5,4-10,5}$	$\frac{7,9 \pm 0,09}{6,5-10,1}$
<i>LA</i>	$\frac{15,8 \pm 0,18}{11,0-20,5}$	$\frac{16,3 \pm 0,17}{12,8-20,0}$	$\frac{15,9 \pm 0,27}{9,3-23,2}$
<i>hA</i>	$\frac{21,7 \pm 0,22}{16,3-26,5}$	$\frac{22,0 \pm 0,20}{17,3-26,4}$	$\frac{22,1 \pm 0,22}{17,3-26,0}$
<i>lP</i>	$\frac{14,4 \pm 0,21}{11,8-21,5}$	$\frac{14,6 \pm 0,13}{9,8-17,2}$	$\frac{14,4 \pm 0,13}{12,2-18,8}$
<i>hP</i>	$\frac{28,8 \pm 0,29}{22,3-35,2}$	$\frac{29,9 \pm 0,24}{24,7-35,8}$	$\frac{29,0 \pm 0,29}{22,8-38,4}$
<i>lV</i>	$\frac{15,4 \pm 0,17}{12,2-19,9}$	$\frac{14,5 \pm 0,16}{10,1-18,2}$	$\frac{16,2 \pm 0,20}{12,0-19,6}$
<i>hV</i>	$\frac{23,1 \pm 0,19}{17,2-27,5}$	$\frac{23,3 \pm 0,19}{18,6-27,6}$	$\frac{23,3 \pm 0,22}{16,7-26,8}$
<i>lC</i>	$\frac{10,4 \pm 0,08}{8,0-12,9}$	$\frac{10,6 \pm 0,14}{9,1-14,2}$	$\frac{10,5 \pm 0,10}{8,8-14,9}$
<i>hC</i>	$\frac{27,4 \pm 0,29}{19,8-33,8}$	$\frac{27,4 \pm 0,25}{21,6-33,3}$	$\frac{27,5 \pm 0,26}{22,2-32,0}$
<i>lD</i>	$\frac{59,6 \pm 0,36}{51,2-68,8}$	$\frac{60,4 \pm 0,26}{55,1-69,1}$	$\frac{60,4 \pm 0,38}{52,6-69,0}$
<i>lD_{жс}</i>	$\frac{41,9 \pm 0,30}{35,9-50,0}$	$\frac{41,0 \pm 0,28}{36,3-48,5}$	$\frac{41,9 \pm 0,58}{29,9-51,2}$
<i>lD_м</i>	$\frac{20,3 \pm 0,21}{14,3-25,3}$	$\frac{20,8 \pm 0,19}{13,4-27,2}$	$\frac{20,9 \pm 0,19}{17,9-24,0}$

Окончание табл. 3

Признак	$\bar{x} \pm m_x$ min – max		
	Большой Утриш (101 экз.)	Магри (91 экз.)	Адлер (73 экз.)
$hD_{жс}$	$\frac{16,1 \pm 0,21}{10,0-21,4}$	$\frac{16,6 \pm 0,17}{11,3-20,8}$	$\frac{16,3 \pm 0,16}{13,2-20,0}$
hD_M	$\frac{20,7 \pm 0,20}{16,4-25,2}$	$\frac{20,5 \pm 0,17}{15,9-24,5}$	$\frac{21,2 \pm 0,18}{18,1-25,5}$
lc	$\frac{39,6 \pm 0,18}{35,3-45,5}$	$\frac{41,4 \pm 0,17}{37,4-45,3}$	$\frac{40,1 \pm 0,21}{34,5-44,0}$
hc	$\frac{62,4 \pm 0,40}{51,7-73,1}$	$\frac{62,3 \pm 0,41}{53,0-70,2}$	$\frac{61,3 \pm 0,47}{52,4-72,5}$
hc_3	$\frac{82,0 \pm 0,45}{70,4-93,1}$	$\frac{79,0 \pm 0,45}{69,8-89,7}$	$\frac{80,8 \pm 0,49}{71,2-92,5}$
lr	$\frac{22,1 \pm 0,19}{14,8-26,9}$	$\frac{21,8 \pm 0,26}{15,6-29,8}$	$\frac{21,4 \pm 0,23}{17,0-25,0}$
mx	$\frac{52,1 \pm 0,29}{46,3-58,1}$	$\frac{52,3 \pm 0,26}{46,2-60,3}$	$\frac{51,0 \pm 0,46}{27,5-64,4}$
mn	$\frac{58,9 \pm 0,33}{47,6-66,7}$	$\frac{58,3 \pm 0,29}{51,9-65,4}$	$\frac{57,2 \pm 0,29}{52,2-62,5}$
o	$\frac{20,6 \pm 0,33}{13,1-31,8}$	$\frac{21,3 \pm 0,32}{14,5-31,6}$	$\frac{20,2 \pm 0,24}{14,6-23,8}$
o_1	$\frac{1,0 \pm 0,00}{1,0-1,0}$	$\frac{1,0 \pm 0,00}{1,0-1,0}$	$\frac{1,0 \pm 0,00}{1,0-1,0}$
po	$\frac{57,2 \pm 0,40}{46,2-66,7}$	$\frac{56,8 \pm 0,36}{49,2-64,4}$	$\frac{56,2 \pm 0,40}{47,8-62,8}$
io	$\frac{20,9 \pm 0,31}{11,4-28,6}$	$\frac{20,9 \pm 0,39}{15,1-31,4}$	$\frac{20,5 \pm 0,26}{15,0-25,6}$
hs	$\frac{14,9 \pm 0,63}{0,0-29,7}$	$\frac{14,1 \pm 0,52}{0,0-25,8}$	$\frac{11,3 \pm 0,74}{0,0-23,8}$
ic	$\frac{60,0 \pm 0,53}{47,2-80,7}$	$\frac{55,8 \pm 0,79}{44,7-67,9}$	$\frac{60,9 \pm 0,58}{50,0-76,8}$
oo	$\frac{33,7 \pm 0,39}{22,9-58,0}$	$\frac{33,3 \pm 0,45}{23,7-64,3}$	$\frac{33,2 \pm 0,34}{25,8-42,5}$
or	$\frac{67,6 \pm 0,55}{51,4-77,4}$	$\frac{66,8 \pm 1,05}{55,6-84,6}$	$\frac{62,8 \pm 0,90}{49,6-75,5}$

Как видно из табл. 3, между значениями рассматриваемых признаков у особей разных акваторий имелись определенные различия. Анализ показал, что распределение рассматриваемых признаков не является нормальным, т.е. на средние значения показателей значительное влияние оказывали «выбросы» – точки, сильно выбивающиеся из выборки и не вписывающиеся в общую модель. Для дальнейшего статистического анализа был использован метод непараметрической статистики – критерий Манна – Уитни.

Обобщенные результаты статистического сравнения меристических и пластических признаков морских ершей разных акваторий представлены в табл. 4. Во всех сравниваемых парах только 10 % изученных меристических признаков имели статистически достоверные различия. При этом доля статистически достоверных различных пластических признаков была весьма высокой и варьировала от 27,9 % при сравнении пластических признаков морских ершей районов Большого Утриша и Магри до 51,2 % – Магри и Адлер, 37,2 % – Большой Утриш и Адлер.

Таблица 4 / Table 4

Обобщенные результаты сравнения меристических и пластических признаков морского ерша рассматриваемых акваторий / General results of comparison of meristic and plastic characteristics of black scorpionfish from considered water areas

Группа	Большой Утриш	Магри	Адлер
Большой Утриш	–	1/12	1/16
Магри	1/12	–	1/22
Адлер	1/16	1/22	–

Примечание. В числителе указано количество статистически достоверно различных меристических признаков, в знаменателе – количество статистически достоверно различных пластических признаков.

В табл. 5 представлены морфологические признаки морских ершей разных акваторий, по которым выявлены достоверные различия.

Таблица 5 / Table 5

Статистически достоверно различные морфологические признаки морских ершей / Statistically significantly different morphological of black scorpionfish

Сравниваемая пара	Признак	Результат сравнения	
		<i>U</i>	<i>p</i>
Большой Утриш – Магри	<i>C</i>	3696,0	0,019
	<i>aD</i>	2725,0	0,000
	<i>pD</i>	2299,0	0,000
	<i>aP</i>	3799,5	0,039
	<i>aV</i>	3112,0	0,000
	<i>VA</i>	3373,5	0,002
	<i>IP</i>	3564,5	0,008
	<i>hP</i>	3714,5	0,022
	<i>IV</i>	3272,0	0,001
	<i>ID_ж</i>	3826,5	0,046
	<i>lc</i>	2015,5	0,000
	<i>hc₃</i>	2893,5	0,000
Большой Утриш – Адлер	<i>ic</i>	3030,5	0,000
	<i>sp.br.</i>	2355,5	0,001
	<i>OD</i>	2819,0	0,001
	<i>H</i>	2972,5	0,030
	<i>iH</i>	2929,5	0,021
	<i>aD</i>	2970,5	0,030
	<i>aA</i>	2789,0	0,006
	<i>PV</i>	2354,0	0,000
	<i>PA</i>	2751,5	0,004
	<i>PP</i>	2344,0	0,000
	<i>IV</i>	2666,5	0,002
	<i>lc</i>	2878,0	0,014
	<i>hc</i>	3036,0	0,048
	<i>lr</i>	3005,5	0,038
	<i>mx</i>	3023,5	0,043
	<i>mn</i>	2510,5	0,000
	<i>hs</i>	2607,0	0,001
<i>or</i>	2156,0	0,000	

Окончание табл. 5

Сравниваемая пара	Признак	Результат сравнения	
		<i>U</i>	<i>p</i>
Магри – Адлер	<i>C</i>	2230,0	0,000
	<i>H</i>	2287,5	0,001
	<i>iH</i>	1995,0	0,000
	<i>aD</i>	1227,0	0,000
	<i>pD</i>	1614,0	0,000
	<i>aP</i>	2021,0	0,000
	<i>aV</i>	2145,0	0,000
Магри – Адлер	<i>PV</i>	2329,0	0,001
	<i>VA</i>	2002,0	0,000
	<i>PA</i>	1872,5	0,000
	<i>PP</i>	1667,0	0,000
	<i>hP</i>	2687,0	0,036
	<i>IV</i>	1588,0	0,000
	<i>hD_m</i>	2470,5	0,005
	<i>lc</i>	2016,5	0,000
	<i>hc₃</i>	2561,5	0,012
	<i>mx</i>	2492,0	0,006
	<i>mn</i>	2581,0	0,014
	<i>o</i>	2546,5	0,010
	<i>o_l</i>	2596,0	0,017
	<i>hs</i>	2587,0	0,015
	<i>ic</i>	1927,5	0,000
	<i>or</i>	2047,5	0,000

Примечание. *U* – *U*-критерий Манна – Уитни; *p* – уровень значимости.

Более точное представление о степени сходства сравниваемых выборок могут давать методы многомерной статистики. Одним из них является дискриминантный анализ, который был использован для оценки степени сходства по комплексу из 43 нормированных пластических и 10 меристических признаков морских ершей априори выделенных групп «Большой Утриш», «Магри», «Адлер».

Степень сходства между априори выделенными группами в дискриминантном анализе была оценена по величине расстояния Махаланобиса между ними. Достоверность отличий в этих расстояниях – по критерию Фишера. Указанные показатели приведены в табл. 6.

Таблица 6 / Table 6

Квадратичные расстояния Махаланобиса между априори выделенными группами и величины критерия Фишера между ними / Mahalanobis distances between a priori selected groups and the values of the Fisher criterion between them

Группа	Большой Утриш	Магри	Адлер
Большой Утриш	–	8,04/5,38*	5,35/3,20*
Магри	8,04/5,38*	–	15,75/8,24*
Адлер	5,35/3,20*	15,76/8,24*	–

Примечание. В числителе указаны квадратичные расстояния Махаланобиса, в знаменателе – величины критерия Фишера; * – величины, имеющие статистически достоверные различия по критерию Фишера.

Как видно из табл. 6, рассматриваемые группы имеют разную степень сходства, при этом различия в морфологии рыб всех рассматриваемых акваторий имели статистически достоверный характер по критерию Фишера. Согласно результатам дискриминантного анализа, наиболее различными по комплексу морфологических признаков были морские ерши районов Магри и Адлера (расстояние Махаланобиса между группами – 15,76), что соответствует результатам предыдущего статистического анализа с использованием критерия Манна – Уитни.

Результаты дискриминантного анализа в графическом виде представлены на рис. 2.

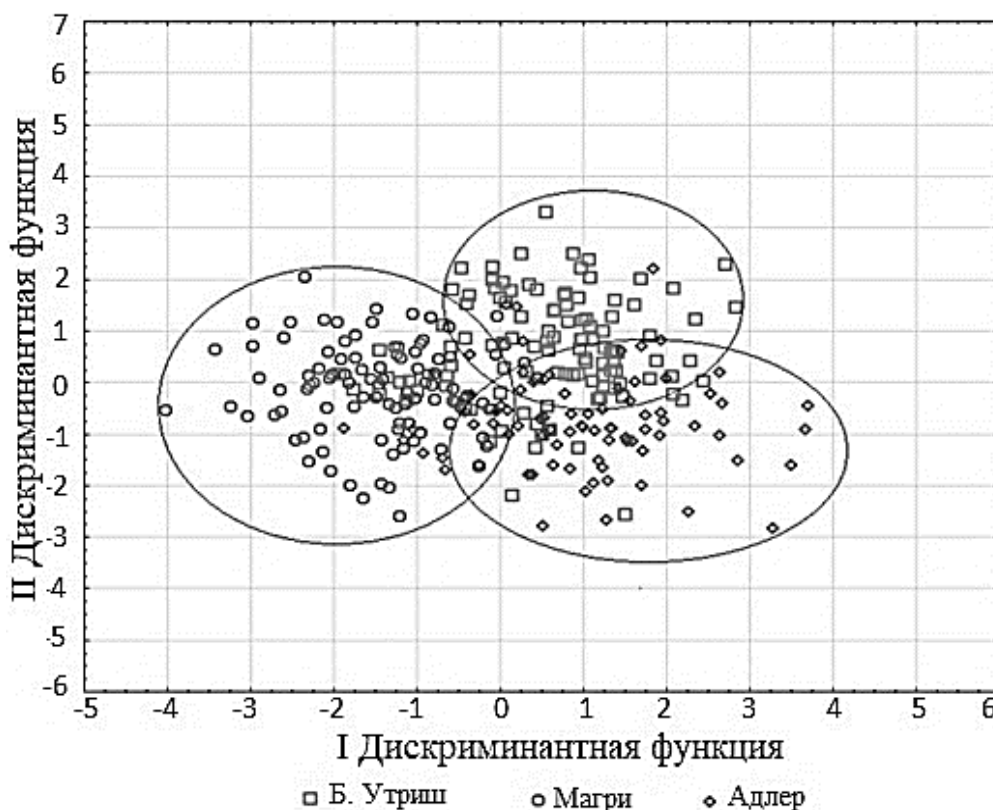


Рис. 2. Распределение априори выделенных групп морского ерша в пространстве дискриминантных функций / Fig. 2. Distribution of a priori distinguished groups of black scorpionfish in the space of discriminant functions

Как видно из табл. 6 и рис. 2, в целом у особей разных акваторий отмечается схожий высокий уровень обособленности по комплексу морфологических признаков.

Дополнительно с помощью дискриминантного анализа рассчитана точность отнесения к априори выделенным группам. Она оказалась весьма высокой. Средняя точность отнесения составила 75,8 %. В группе «Большой Утриш» – 67,4 %, «Магри» – 75,3, «Адлер» – 84,8 % (табл. 7).

Таблица 7 / Table 7

Точность отнесения к априори выделенным группам по комплексу морфологических признаков / Accuracy of assignment to a priori selected groups according to the complex of morphological signs

Группа	%	Большой Утриш	Магри	Адлер
Большой Утриш	67,4	67,4	21,2	11,4
Магри	75,3	19,4	75,3	5,3
Адлер	84,8	11,1	4,1	84,8

При этом характерно, что во всех группах были отмечены особи, по комплексу морфологических признаков относящиеся к иному району.

Заключение

В целом результаты исследования показывают, что морские ерши рассматриваемых акваторий кавказского шельфа Черного моря обладают весьма различными комплексами морфологических признаков, по которым можно успешно отличать представителей разных районов друг от друга. При этом различия в большинстве меристических признаков у особей разных акваторий незначительны, но пластические показатели характеризуются высоким уровнем отличий.

Клиальная изменчивость уровня данных различий в нашем исследовании не выявлена. Серия статистических анализов с использованием критерия Манна – Уитни и дискриминантный анализ показали, что морские ерши района Адлера имели более значительные различия в морфологии с морскими ершами района Магри, чем с особями значительно более географически удаленной акватории Большого Утриша.

Особого внимания заслуживает тот факт, что в каждой из трех изученных акваторий присутствовали особи, по комплексу морфологических признаков относящиеся к иному географическому району.

Во взрослом состоянии морские ерши ведут оседлый малоподвижный донный образ жизни, совершая лишь незначительные перемещения в прибрежной зоне, преимущественно для добычи пищи или нахождения готовых к нересту половых партнеров [1]. Однако, как и у большинства других малоподвижных видов черноморских рыб, у морского ерша имеются пелагические стадии развития, обеспечивающие его расселение.

Икра морского ерша выметывается в прозрачной слизистой оболочке (часть внутреннего слоя яичника) на грунт. Но при контакте с водой оболочка через некоторое время набухает и поднимается в толщу воды, где происходит освобождение икринок от стромы яичника. Дальнейшее развитие икры происходит в толще воды [10, 14]. Период эмбрионального развития в зависимости от температуры воды составляет 42–72 ч.

Личиночная стадия развития морского ерша также проходит в толще воды на глубинах до 20–25 м. Личинки отмечены как в открытом море, так и в бухтах. Молодь переходит к донному образу жизни при длине 12–15 мм [5, 15, 16].

Учитывая, что мальков морского ерша в донных биотопах начинают фиксировать в июле, а нерест у этого вида в Черном море начинается в мае [5], можно предположить, что планктонная стадия имеет продолжительность около 1,5–2,0 мес.

Принимая среднюю скорость основного черноморского течения равной 8,8 см/с [17], можно предположить, что за время нахождения в пелагиали молодь морского ерша может относиться от места вымета икры на 340–450 км. При этом расстояние (по прямой) между максимально удаленными рассматриваемыми акваториями – район Большого Утриша и Адлера – не превышает 250 км, между акваториями в районе Адлера и Магри – 90 км, Магри и Большого Утриша – 160 км. Таким образом, вполне возможно, что в каждой акватории присутствует часть особей, развившихся из икры, занесенной из другой акватории.

При этом важно отметить однонаправленный характер перемещения с водами основного черноморского течения – с востока на запад. Миграции особей в противоположном направлении могут иметь лишь незначительный характер, происходить в потоках менее значимых локальных течений и осуществляться в меньших объемах, с меньшей интенсивностью и скоростью продвижения. Однако в рассматриваемых выборках в незначительном количестве присутствовали особи, по результатам дискриминантного анализа комплекса морфологических признаков отнесенные к более западным акваториям (в районе Адлера – рыбы с морфотипами Магри и Большого Утриша, в районе Магри – Большого Утриша). Данное противоречие, по нашему мнению, объяснимо тем, что определяющим фактором, влияющим на формирование морфотипа особей, является комплекс воздействующих факторов среды обитания в месте их постоянного обитания, а не генетическая предрасположенность особей.

В этом случае низкий уровень отличий по меристическим признакам и высокий – по пластическим хорошо объясняются единством генетической структуры сравниваемых групп рыб. Пластические признаки во многом формируются в ходе онтогенеза под влиянием конкретных факторов среды (в пределах видовой нормы реакции), а меристические показатели являются в большей степени отражением генотипа.

Наличие в каждом районе незначительного количества особей с морфотипом, характерным для рыб иного района, вероятно, свидетельствует о том, что в пределах конкретного рассматриваемого района имеются отдельные участки с менее характерными для данного района условиями (например, участки большего или меньшего прогрева воды, опреснения и т.д.). При этом в указанных участках условия среды обитания относительно схожи с условиями иного рассматриваемого района. В этом случае некоторые особи могли большую часть онтогенеза либо в ключевые периоды формирования морфотипа находиться в указанных нетипичных участках района, что, соответственно, привело к формированию у них морфотипа, в целом нетипичного для данного района, но свойственного особям другого рассматриваемого района (с более схожими условиями обитания).

Таким образом, существующие различия в морфологии морских ершей рассматриваемых акваторий, по нашему мнению, возникли как ответная реакция на воздействующие факторы среды обитания в течение жизни особей, а не обусловлены генетической (наследственной) предрасположенностью, характерной для рыб разных популяций (субпопуляций).

Список источников

1. Пашков А.Н., Шевченко Н.Ф., Овен Л.С., Гирагосов В.Е., Круглов М.В. Распределение, численность и основные популяционные характеристики морского ерша *Scorpaena porcus* в условиях антропогенного загрязнения Черного моря // Вопросы ихтиологии. 1999. Т. 39, № 5. С. 661–668.
2. Boissin E., Micu D., Janczyszyn-Le Goff M., Neglia V., Bat L., Todorova V., Panayotova M., Kruschel C., Macic V., Milchakova N., Keskin C., Anastasopoulou A., Nasto I., Zane L., Planes S. Contemporary genetic structure and postglacial demographic history of black scorpionfish *Scorpaena porcus* in the Mediterranean and the Black Seas // Molecular Ecology. 2016. Vol. 25. P. 2195–2209.
3. Малахова Л.В., Скуратовская Е.Н., Малахова Т.В., Болтачев А.Р., Лобко В.В. Хлороорганические соединения в ерше *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 в акватории Севастополя (Черное море): пространственное распределение и биологический отклик на уровень накопления загрязнителей // Морской биол. журн. 2018. Т. 3 (4). С. 51–63.
4. Пашков А.Н. Ихтиофауна прибрежного шельфа Черного моря в полигалинных акваториях : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2001. 25 с.
5. Световидов А.Н. Рыбы Черного моря. М.; Л., 1964. 552 с.
6. Васильева Е.Д. Рыбы Черного моря: определитель морских, солоноватоводных, эвригалинных и проходных видов с цветными иллюстрациями, собранными С.В. Богородским. М., 2007. 238 с.
7. Пашков А.Н., Круглов М.В. Морской ерш (*Scorpaena porcus* L., Pisces) у Южного берега Крыма: неоднозначный ответ на воздействие антропогенных факторов // Проблемы общей биологии и прикладной экологии. Саратов, 1997. С. 31–35.
8. Овен Л.С., Руднева И.И., Шевченко Н.Ф. Ответные реакции морского ерша *Scorpaena porcus* (Scorpaenidae) на антропогенное воздействие // Вопросы ихтиологии. 2000. Т. 40, № 1. С. 75–78.
9. Пряхин Ю.В., Шкицкий В.А. Методы рыбохозяйственных исследований. Краснодар, 2006. 214 с.
10. Смирнов А.И. Окунеобразные, скорпенообразные, камбалообразные, удильщикообразные, присоскоперообразные // Фауна Украины: в 40 т. Т. 8: Рыбы. Вып. 5. Киев, 1986. 320 с.
11. Решетников Ю.С., Попова О.А. О методиках полевых ихтиологических исследований // Труды ВНИРО. 2015. Т. 156. С. 114–131.
12. Лакин Г.Ф. Биометрия. М., 1973. 343 с.
13. Кендалл М.Д., Стьюарт А.М. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1985. 565 с.
14. Водяницкий В.А. Пелагические яйца и личинки рыб в районе Новороссийской бухты // Тр. Новороссийской биол. станции. 1930. Вып. 4. С. 93–130.
15. Дехник Т.В. Особенности строения, экологии пелагических икринок и личинок рыб Черного моря // Биология моря. 1971. Вып. 25. С. 3–29.
16. Дехник Т.В. Ихтиопланктон Черного моря. Киев, 1973. 234 с.
17. Белевич Р.Р., Сриберко А.В., Степанова Ю.В. Оценка особенностей циркуляции вод Черного моря по климатическим данным // Укр. гидрометеорол. журн. 2014. № 15. С. 214–222.

References

1. Pashkov A.N., Shevchenko N.F., Oven L.S., Giragosov V.Ye., Kruglov M.V. Distribution, assessment and prevalence of population characteristics of black scorpionfish *Scorpaena porcus* in the conditions of anthropogenic damage to the Black Sea. *Voprosy ikhtiologii = Journal of Ichthyology*. 1999;39(5):661-668. (In Russ.).

2. Boissin E., Micu D., Janczyszyn-Le Goff M., Neglia V., Bat L., Todorova V., Panayotova M., Kruschel C., Macic V., Milchakova N., Keskin C., Anastasopoulou A., Nasto I., Zane L., Planes S. Contemporary genetic structure and postglacial demographic history of black scorpionfish *Scorpaena porcus*, in the Mediterranean and the Black Seas. *Molecular Ecology*. 2016;25:2195-2209.
3. Malakhova L.V., Skuratovskaya E.N., Malakhova T.V., Boltachev A.R., Lobko V.V. Organochlorine compounds in scorpion fish *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 in the Sevastopol marine area (Black Sea): spatial distribution and biological response. *Morskoi biologich. zhurn. = Marine Biological Journal*. 2018;3(4):51-63, doi: 10.21072/mbj.2018.03.4.06. (In Russ.).
4. Pashkov A.N. *Ichthyofauna of the coastal shelf of the Black Sea in polyhaline water areas*. Dissertation Thesis. Moscow, 2001. 25 p. (In Russ.).
5. Svetovidov A.N. *Black Sea fishes*. Moscow, Leningrad, 1964. 552 p. (In Russ.).
6. Vasilyeva E.D. *Fishes of the Black Sea*. Oceanic marine, brackish, euryhaline and anadromous species with color illustrations collected by S.V. Bogorodsky. Moscow, 2007. 238 p. (In Russ.).
7. Pashkov A.N., Kruglov M.V. Black scorpionfish (*Scorpaena porcus* L., Pisces) near the southern coast of Crimea: an ambiguous response to the impact of anthropogenic factors. *Problems of General Biology and Applied Ecology*. Saratov, 1997:31-35. (In Russ.).
8. Oven L.S., Rudneva I.I., Shevchenko N.F. Responses of the black scorpionfish *Scorpaena porcus* (Scorpaenidae) to anthropogenic impact. *Voprosy ikhtiologii = Journal of Ichthyology*. 2000;40(1):75-78. (In Russ.).
9. Pryakhin Yu.V., Shkitskiy V.A. *Fishery research methods*. Krasnodar, 2006. 214 p. (In Russ.).
10. Smirnov A.I. Perciformes, scorpaeniformes, flatfish, anglerfish, gobiesociformes. *Fauna of Ukraine*. In the 40 vol. Vol. 8, iss. 5. Fish. Kyiv, 1986. 320 p. (In Russ.).
11. Reshetnikov Yu.S., Popova O.A. About the methods of field ichthyological research. *Trudy VNIRO*. 2015;156:114-131. (In Russ.).
12. Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow, 1973. 343 p. (In Russ.).
13. Kendall M., Stuart A. *Design and analysis, and time-series*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 565 p. (In Russ.).
14. Vodyanitsky V.A. Pelagic eggs and fish larvae in the area of Novorossiyskaya Bay. *Works of Novorossiysk Biology Station*. 1930;4:93-130. (In Russ.).
15. Dekhnik T.V. Features of the structure, ecology of pelagic eggs and fish larvae of the Black Sea. *Biologia moray = Marine Biology*. 1971;(25):3-29. (In Russ.).
16. Dekhnik T.V. *Ichthyoplankton of the Black Sea*. Kyiv, 1973. 234 p. (In Russ.).
17. Belevich R.R., Striberko A.V., Stepanova Yu.V. Evaluation of the features of the circulation of the Black Sea waters according to climatic data. *Ukr. gidrometeorol. zhurn. = Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2014;(15):214-222. (In Russ.).

Информация об авторах

А.А. Полин – начальник отдела рыбоводства, Азово-Черноморский филиал ФГБУ «Главрыбвод»; аспирант кафедры экологии и природопользования, Южный федеральный университет.

Н.В. Попова – лаборант-микробиолог.

Т.В. Денисова – доктор биологических наук, профессор кафедры экологии и природопользования.

Information about the authors

A.A. Polin - Head of Fish Farming Department, Azov-Black Sea Branch "Glavrybvod"; Post-Graduate of the Department of Ecology and Nature Management, Southern Federal University.

N.V. Popova - Laboratory Assistant-Microbiologist.

T.V. Denisova - Doctor of Science (Biology), Professor of the Department of Ecology and Nature Management.

Статья поступила в редакцию 11.02.2022; одобрена после рецензирования 03.03.2022; принята к публикации 16.05.2022.
The article was submitted 11.02.2022; approved after reviewing 03.03.2022; accepted for publication 16.05.2022.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

SCIENTIFIC LIFE

Краткое сообщение

doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-123-126

ДОНСКОЙ ФЕСТИВАЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА «ВОСПЕТАЯ СТЕПЬ»

DON ECOLOGICAL TOURISM FESTIVAL “GLORIFIED STEPPE”

За многие годы этот фестиваль стал брендом, визитной карточкой природы Донского края, доброй весенней традицией. В 2013 г. ассоциация «Живая природа степи» (далее – ассоциация) на базе своего Центра редких животных европейских степей (далее – центр) в окрестностях пос. Орловского Ростовской области (РО) организовала I фестиваль экологического туризма. На него пригласили любителей и защитников природы, прежде всего учащихся школ Орловского р-на, студентов и преподавателей Южного федерального университета (ЮФУ), членов общественных экологических структур, природоохранных организаций, администраций районов и РО. Активное участие в фестивале принял заповедник «Ростовский». Прошел он 10–11.10.2013 в период перелета журавлей, стрепетов, гусей, уток и иных птиц. Состоялись «марш флагов» школьников, выступления «Скифских амазонок» на лошадях, демонстрация соколиной охоты, дискуссии по экологическим вопросам, знакомство с самым крупным в России, живущим в искусственных условиях стадом сайгаков и природой заповедника, подсчеты журавлей и многое другое.



Фестиваль стал своеобразным отчётом по работе ассоциации и связанных с ней структур по охране природы, экологическому образованию и воспитанию населения, развитию туризма на Дону. В нем приняли участие около 300 участников. Фестиваль показал его важность в формировании экологических знаний и культуры у населения, объединении его усилий при решении природоохранных вопросов, сохранении природных ресурсов Донской земли. Участники отметили целесообразность регулярного проведения подобных фестивалей. На базе центра, питомника ассоциации, заповедника прошли также II (18–19.04.2014, около 500 участников) и III (19–20.09.2014, 630) фестивали.

Ответственность за IV (18–19.04.2015, около 3500) и последующие фестивали взяла администрация РО, проводить их стали весной в охранной зоне заповедника, а ассоциация и заповедник стали основными исполнителями. С годами популярность этого праздника, число посетителей увеличивались. На V фестивале (16–17.04.2016) было более 7 тыс. человек. В Год экологии и создания особо охраняемых природных территорий (ООПТ) (2017) он вошел в федеральные планы по этому году, и на VI (02–29.04.2017) присутствовали 15 тыс. Для сохранения травостоя и всего биоразнообразия степи с 2018 г. количество зарегистрированных экотуристов стали ограничивать. На VII (20–23.04.2018), VIII (13–20.04.2019) и IX (24–25.04.2021) фестивалях было зарегистрировано по 7 тыс. посетителей. Примерно столько же отдыхало в охранной зоне неофициально.

В фестивалях регулярно участвуют администрации РО и р-нов области, члены Законодательного собрания (ЗС) РО, Общественной палаты РО, Департамента МЧС по РО и многие другие; их поддерживают ОАО «Газпром газораспределение Ростов-на-Дону», ООО «Газпром межрегионгаз Ростов-на-Дону», ЮФУ, ЮНЦ РАН, ЗАО «Аксинья» – АО «Семикаракорская керамика», ООО «Солнечное» и другие структуры. За несколько дней в степи в р-не пос. Волочаевского вырастает палаточный городок со сценой, многочисленными мастер-классами, презентационными площадками, сувенирными шалашами, стоянками для автомашин, медпунктами, зонами питания и сувенирами. Помимо жителей РО, в них участвуют гости из Калмыкии, Кубани, Ставрополья, Москвы, Санкт-Петербурга, Мурманска, Волгоградской, Воронежской, Московской областей и других мест России. Свои площадки представляют районы РО, Волгодонская АЭС, Азовский музей-заповедник, Музей-заповедник им. Шолохова, ЮНЦ РАН, ЮФУ, ДГТУ, ДГАУ, Южно-Русский ГПУ, другие государственные и общественные структуры. Гостями фестиваля были губернатор и министры РО, председатели и члены ЗС РО, представитель президента России по вопросам природоохранной деятельности, экологии и транспорта С.Б. Иванов, председатель правления ОАО «Газпром» РФ А.Б. Миллер, гендиректор ООО «Газпром межрегионгаз Ростов-на-Дону» А.М. Узденов, министры Минприроды РФ и Министерства транспорта РФ, член СФ РФ Т.А. Гигель, президент Сбербанка России Г.О. Греф, члены ЮНЕСКО, СИТЕС и WWF, популяризатор природы Н.Н. Дроздов, многие другие известные лица. Здесь проводились природоохранные семинары для учителей, работников библиотек и иных структур, лекции для школьников. Состоялось несколько научных конференций ученых и специалистов по экологическим вопросам с участием академиков РАН В.Н. Большакова, Ю.Ю. Балеги, Г.Г. Матишова, В.В. Рожнова, иных ведущих ученых страны.



Юбилейный X фестиваль состоялся 23–24.04.2022 после длительных ковидных ограничений и совпал со временем, когда вся степь покрылась разноцветным ковром цветов на фоне нежной зелени. Цветение тюльпанов Геснера (Шренка), Биберштейна и двуцветкового, касатика карликового, многих других весенних трав, создавших неповторимые красочные узоры степного ковра, масовый перелет пернатых, мелодичные песни многочисленных жаворонков в небе и резкий свист сусликов на земле создавали неповторимую картину прекрасной весенней степи. Фестиваль собрал

около 7 тыс. экотуристов. Организаторами выступили минприроды РО, ассоциация, заповедник, Ростовское областное отделение Русского географического общества (РОО РГО), администрация Орловского района. Фестиваль посетила делегация Всероссийской общественной организации «РГО», возглавляемая вице-президентом общества акад. РАН А.А. Чибилевым.

Гостей со сцены приветствовали зампреда ЗС РО, министры минприроды и сельского хозяйства РО, глава Орловского р-на, другие известные люди РО и страны. Специалисты и организации области, внесшие заметный вклад в охрану природы Донской земли, были отмечены наградами. Состоялся большой концерт с песнями и танцами юных казаков, кадетов, народных коллективов Орловского и соседних районов. На площади рядом с визит-центром заповедника функционировали тематические фотозоны природно-заповедного фонда РО. Свои работы представили народные умельцы, работающие с природными материалами. В 4 шатрах находились интерактивные экспозиции, посвященные природным ресурсам Дона, их рациональному использованию, методам изучения. Шатер минприроды РО знакомил посетителей с составом атмосферного воздуха и его загрязнителями, водными объектами, использованием отходов, обитателями водоемов, биоразнообразием степей, палеонтологическими находками окаменелостей обитавших на территории РО животных. Свои площадки представили заповедник, дирекция ООПТ РО, музей-заповедник М.А. Шолохова, ЮНЦ РАН, ассоциация, РОО РГО, Ин-т степи УрО РАН, администрация Орловского р-на, Ростовская АЭС, АО «Семикаракорская керамика», ДГТУ, ЮФУ и многие другие структуры.

Участники фестиваля знакомились с экспонатами, природоохранной деятельностью разных структур и друг с другом, обменивались успехами и трудностями, обсуждали пути решений отдельных проблем, согласовывали вопросы сотрудничества. В большом шатре около соленого озера Круглое ученые ЮФУ, ЮНЦ РАН, Ин-та степи УрО РАН, других центров познакомили школьников, кадетов, студентов и всех интересующихся с современными проблемами экологии, работами научных центров и перспективными исследованиями. Здесь экотуристы получили ответы на все интересующие их экологические вопросы. Делегация РГО обсудила с коллегами из ЮФУ, ЮНЦ РАН, ассоциации, иных структур перспективные планы работы.

Другие площадки фестиваля служили для экскурсий, знакомства гостей с уникальностью маньчжурской степи. На склонах соленых озер Лопуховатое и Груз-



ское они наблюдали зеленые ковры с цветами тюльпанов, ирисов и других травянистых растений; по берегам оз. Маныч-Гудило – чаек, куликов, уток; на земле – полевок, полозов, ящериц, насекомых и других животных. Воздух был заполнен песнями жаворонков, встречались пролетающие курганники, луни, пустельги, иные птицы. Участники посетили полевой стационар ассоциации, где познакомилось с лошадьми Пржевальского, верблюдами, ламами, бизонами, буйволами, яками, сайгаками и другими животными. Все это дало гостям хорошее настроение и новые знания о природе степей, обеспечило редкими фотографиями.

На всех фестивалях официально побывали около 45–50 тыс. экотуристов. Примерно столько же жителей Орловского и соседних районов посетило охранную зону в это время неофициально. Фестивали формируют у людей экологическое мышление, понимание необходимости сохранения и разумного использования природных ресурсов, они объединяют для этих целей различные государственные, общественные и частные структуры. Если на первых фестивалях участники нередко пытались собирать букеты из тюльпанов и ирисов, убивать ужей и лягушек, дразнить животных в питомнике, то в последние годы этого уже не встретишь. Понимая, что экологическая обстановка определяет здоровье, продолжительность жизни и благосостояние, они обычно активно участвуют в очистке природы от мусора, озеленении территорий, защите древесных насаждений населенных пунктов, их парков, улиц от вырубки деревьев.



Фестиваль имеет эстетическое и просветительское значение для населения, прежде всего молодежи, дает возможность окунуться в естественную атмосферу цветущей степи. Посетители получают богатую информацию о природе степей, природоохранные знания и понимание роли природы в нашей жизни.

В.А. Миноранский

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, М.С. Шипитко

Подписано в печать 27.06.2022. Выход в свет 30.06.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 14,62. Уч.-изд. л. 15,75. Тираж 250 экз. Заказ № 8556.

Адрес редакции и издателя (для переписки): 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, ЮФУ,
журнал «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки»,
e-mail: izvestiya@sfedu.ru, адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru

Адрес редколлегии: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110,
тел.: +7 (863) 218-40-00 доб. 11-093; доб. 11-094.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

Magazine released T.A. Vatulyan, L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, M.S. Shipitko

Signed print June 27, 2022. The publication June 30, 2022. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 14.62. Publ. sign. 15.75. Edition 250 copies. Order number 8556.

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. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office Word 2000, 2003, 2007, 2010, 2016 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). В неподписной период отдельные номера журнала за нынешний и прошлые годы можно приобрести в редакции.

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

ISSN 1026-2237. Doi 10.18522/1026-2237-2022-2. Известия высших учебных заведений.
Северо-Кавказский регион. Естественные науки.

2022. № 2